

ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО № 17 (117)
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА 2008

ISSN 1991-976X

СЕРИЯ

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ,
РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Выпуск 8



ПОСВЯЩАЕТСЯ
65- ЛЕТИЮ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Редакционная коллегия:

Д.т.н., профессор **Шестаков А.Л.** (*отв. редактор*); д.т.н., профессор **Казаринов Л.С.** (*зам. отв. редактора*); д.т.н., профессор **Щипицын А.Г.** (*зам. отв. редактора*); д.т.н., профессор **Войтович Н.И.**; д.т.н., профессор **Логиновский О.В.**; д.т.н., профессор **Тележкин В.Ф.**; д.т.н., профессор **Карманов Ю.Т.**; д.т.н., профессор **Лысов А.Н.**; к.т.н., доцент **Кафтаников И.Л.**; **Фокин Л.А.** (*техн. редактор*)

СОДЕРЖАНИЕ

ШЕСТАКОВ А.Л., КАЗАРИНОВ Л.С. Программа «Энерго- и ресурсосберегающие технологии» национального проекта «Образование»	4
КАЗАРИНОВ Л.С., ШНАЙДЕР Д.А. Оперативное управление технологическими процессами с прогнозом показателей энергетической эффективности.....	9
КОПЦЕВ Л.А., ЖУРАВЛЕВ Ю.П. Управление энергетической эффективностью электросталеплавильного цеха.....	13
КАЗАРИНОВ Л.С., ИГНАТОВА Т.А., КИНАШ А.В., КОЛЕСНИКОВА О.В., ШНАЙДЕР Д.А. Оперативное регулирование экономичности горения в энергетических котлах.....	21
КАЗАРИНОВ Л.С., ИГНАТОВА Т.А., КОЛЕСНИКОВА О.В. Оптимизация нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов по данным эксплуатации при неполных исходных данных.....	24
ШНАЙДЕР Д.А. Автоматизированная система диспетчерского управления теплоснабжением зданий на основе полевых технологий.....	29
КАРМАНОВ Ю.Т., СПИЦЫН В.С., ГРИГОРЬЕВ М.М., СПИЦЫН В.В. Гибкое решение для беспроводной передачи данных в технологиях «Умный дом»	33
КАРМАНОВ Ю.Т., КАРМАНОВ А.Ю. Обеспечение приема радиосигналов от приборов учета потребления энергоресурсов в жилых квартирах на фоне помех путем их дополнительной модуляции	37
ДЕГТЯРЬ А.Б., ПАНФЕРОВ В.И. Построение алгоритма импульсного отопления зданий и исследование режимов его работы	41
ШНАЙДЕР Д.А. Оперативное управление потоками энергетических ресурсов в производственных сетях с учетом динамики их аккумуляции	45
ВАХРОМЕЕВ И.Е., ЕВЧИНА Ю.Б., ШНАЙДЕР Д.А. Автоматизированное управление процессами в охладительных установках электрических станций	50
ШНАЙДЕР Д.А., ДИВНИЧ П.Н., БАРБАСОВА Т.А. Автоматизированная компрессорная установка	54
КАЗАРИНОВА В.Л., ШНАЙДЕР Д.А. Паспортизация промышленных потребителей топливно-энергетических ресурсов с использованием средств автоматизации	58
ВЕРНЕРГОЛЬД А.Р., КАЗАРИНОВ Л.С., КОЛЕСНИКОВА О.В. Лингвистический подход к оптимизации управления вельц-процессом.....	61
ВУКОЛОВА А.И., НИКОЛАЕНКО А.В. Метод определения фактической температуры металла поверхностей нагрева котлов	66
СТРЕЛКОВА О.В., ШЕСТАКОВ А.Л. Алгоритм оценки состояния термопреобразователя сопротивления с использованием тестовых воздействий	68
МАЛАФЕЕВ А.В., БУЛАНОВА О.В., РОТАНОВА Ю.Н. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при отделении от энергосистемы в результате короткого замыкания	72
ABSTRACTS AND KEYWORDS.....	75
AUTHORS INFORMATION	77

CONTENTS

SHESTAKOV A.L., KAZARINOV L.S. Programme «Energy and resource-saving technologies» of the national project «Education»	4
KAZARINOV L.S., SHNAIDER D.A. Operational engineering processes control with prognosis of energy efficiency indices	9
KOPTSEV L.A., ZHURAVLEV Y.P. Control of energy efficiency of arc-furnace plant	13
KAZARINOV L.S., IGNATOVA T.A., KINASH A.V., KOLESNIKOVA O.V., SHNAIDER D.A. Operational regulation of combustion economy in power boilers	21
KAZARINOV L.S., IGNATOVA T.A., KOLESNIKOVA O.V. Optimization of twin turbochargers load according to exploitation data by incomplete source data	24
SHNAIDER D.A. Computer-based supervisory control system of building heat supply on the basis of field technologies	29
KARMANOV Y.T., SPITSYN V.S., GRIGOREV M.M., SPITSYN V.V. Flexible decision for wireless data transfer in the «Smart home» technologies	33
KARMANOV Y.T., KARMANOV A.Y. Provision of radio signal reception from devices registering the consumption of energy resources in dwelling apartments against the noise by their additional modulation	37
DEGTYAR A.B., PANFEROV V.I. Projection of algorithm of pulsed building heating and research of the modes of its work	41
SHNAIDER D.A. Operational flow control of power resources in production networks with regards to dynamics of their accumulation	45
VAKHROMEYEV I.E., EVCHINA Y.B., SHNAIDER D.A. Automated process control in refrigerating plants of power stations	50
SHNAIDER D.A., DIVNICH P.N., BARBASOVA T.A. Automated compressor plant	54
KAZARINOVA V.L., SHNAIDER D.A. Certification of industrial customers of fuel-energy recourses with resort to automation facilities	58
VERNERGOLD A.R., KAZARINOV L.S., KOLESNIKOVA O.V. Linguistic approach to optimization of waelz-process control	61
VUKOLOVA A.I., NIKOLAENKO A.V. Real temperature estimation method of metal of boiler heating surface	66
STRELKOVA O.V., SHESTAKOV A.L. Analysis algorithm of resistance temperature device state with usage of test exposure	68
MALAFEEV A.V., BULANOVA O.V., ROTANOVA Y.N. Research of dynamical stability of industrial power systems with own power stations at separation from the electric system in the result of short-circuit failure	72
ABSTRACTS AND KEYWORDS	75
AUTHORS INFORMATION	77

ПРОГРАММА «ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ» НАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТА «ОБРАЗОВАНИЕ»

А.Л. Шестаков, Л.С. Казаринов

Рассматриваются основные направления работ приборостроительного факультета Южно-Уральского государственного университета по реализации программы «Энерго- и ресурсосберегающие технологии» национального проекта «Образование».

Ключевые слова: Южно-Уральский государственный университет, ЮУрГУ, приборостроительный факультет, национальный проект «Образование».

Повышение экономичности технологических процессов является насущной задачей, стоящей в настоящее время перед энергетикой, промышленностью и жилищно-коммунальным хозяйством. В условиях Российской Федерации энергетическая эффективность технологических процессов является весьма низкой по сравнению с ведущими индустриально-развитыми странами. Это обуславливает большие потери топливно-энергетических ресурсов, повышает себестоимость производимой продукции и оказываемых услуг, ухудшает экологические показатели.

Вследствие высокой важности повышения энергетической эффективности хозяйства Российской Федерации в целом в настоящее время как на федеральном, так и на региональном уровнях проводится активная политика энергосбережения. В стране принят Федеральный закон «Об энергосбережении». Существуют региональная и областная программы по энергосбережению. Многие предприятия, прежде всего энергоемкие, вынуждены реализовывать техническую, экономическую, организационную деятельность собственными стандартами предприятия, в которых определяются условия для реализации энергосберегающих программ. Так, например, программа по энергосбережению, проводимая ОАО «ММК», получила высокую оценку со стороны Правительства РФ, а ее участники являются лауреатами премии Правительства РФ в области науки и техники.

Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ) активно участвует в разработке научного и технического обеспечения энергосберегающих технологий.

В 2007 г. Южно-Уральский государственный университет выиграл грант и приступил к выполнению приоритетного национального проекта «Образование» по программе «Энерго- и ресурсосберегающие технологии». Приборостроительный фа-

культет сыграл решающую роль в формировании данной программы. Непосредственно на факультете реализуется две подпрограммы:

- подпрограмма II «Кадровое и научное обеспечение развития и внедрения передовых технологий энергосбережения и управления энергопотреблением в металлургическом производстве» – научный руководитель доктор технических наук, профессор Казаринов Л.С. (кафедры «Автоматика и управление», «Электрические станции, сети и системы»);

- подпрограмма IV «Кадровое и научное обеспечения производства и внедрения интеллектуальных систем индивидуального учета энергоресурсов в жилищно-коммунальном хозяйстве» – научный руководитель доктор технических наук, профессор Шестаков А.Л. (кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии», «Цифровые радиотехнические системы», «Конструирование и производство радиоаппаратуры»).

Победа университета в конкурсе национального проекта «Образование» по тематике энерго- и ресурсосбережения является признанием научных заслуг университета и с ним приборостроительного факультета в данной области исследований.

Особо здесь следует отметить успехи, достигнутые кафедрой автоматики и управления (научный руководитель д.т.н., проф. Казаринов Л.С.) и кафедрой информационно-измерительной техники (научный руководитель д.т.н., проф. Шестаков А.Л.).

На кафедре автоматики и управления в УНИ ЮУрГУ создан научно-технический центр «Инженерные сети и системы». Одним из достижений данного Центра является создание автоматизированной системы диспетчеризации и регулирования теплоснабжения зданий. Особенностью системы является то, что в ней используются современные сетевые технологии полевого уровня, которые позволяют достаточно дешево подключить к однопроводной линии связи сотни датчиков параметров теплоснабжения. Для данной системы разработан специализированный сетевой контроллер, позволяющий осуществлять управление теплоснабжением в составе автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов зданий. Разработчиками контроллера являются

Шестаков Александр Леонидович – д.т.н., профессор, ректор ЮУрГУ; admin@urc.ac.ru.

Казаринов Лев Сергеевич – д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ, заведующий кафедрой автоматики и управления ЮУрГУ; kazarinov@ait.susu.ac.ru.

доцент кафедры АиУ кандидат технических наук Шнайдер Д.А., инженер кафедры АиУ Шипкин М.В. Указанная автоматизированная система была установлена в Курчатовском районе города Челябинска в микрорайонах 13, 18 и 8 в рамках демонстрационного проекта по энергосбережению города Челябинска. В настоящее время автоматизированная система диспетчеризации внедряется на промплощадки ОАО «ММК», здесь установлено 25 подобных систем. Планируется установка в городе Копейске, микрорайоне Тополиная аллея города Челябинска и других местах.

Широко ведутся хозяйственные работы с базовым металлургическим предприятием Южного Урала ОАО «ММК». Здесь разрабатываются и внедряются автоматизированные системы мониторинга эффективности использования оборудования электрических станций, разработан и внедрен оригинальный подход к оценке текущего состояния оборудования и планированию ремонтно-профилактических работ по критериям минимума вероятности пропуска аварийных ситуаций и вероятности ложной тревоги. Разрабатываются программы анализа режимов систем теплоснабжения и повышения эффективности их функционирования. Разработана автоматизированная база данных энергетического оборудования потребителей.

На материалах проведенных работ под научным руководством профессора Казаринова Л.С. были защищены кандидатские диссертации преподавателями и сотрудниками кафедры автоматика и управление: доцентом Шнайдером Д.А., доцентом Барбасовой Т.А., доцентом Казариновой В.Л., доцентом Вставской Е.В., аспирантом Безруковым Д.А., доцентом Поповой О.В. и ассистентом Хасановым А.Р. По той же тематике защитились доцент Касюк С.Т., начальник цеха автоматизации Челябинского цинкового завода Головкин Ф.П., инженер Центра энергосберегающих технологий ОАО «ММК» Япрынцева И.А. Ранее по тематике энергосбережения защитили кандидатские диссертации начальник управления инфраструктуры Министерства строительства инфраструктуры и дорожного хозяйства Правительства Челябинской области Белавкин И.В., заместитель начальника управления инфраструктуры Челябинской области Самсонов П.Л.

1. Подпрограмма II «Кадровое и научное обеспечение развития и внедрения передовых технологий энергосбережения и управления энергопотреблением в металлургическом производстве»

В рамках выполнения национального проекта поставлена задача создания специального Южно-Уральского учебно-научного центра «Энергосбережение в металлургической промышленности» для проведения учебных, учебно-исследовательских, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию интегрированных систем контроля, планирования и управления потреблением

энергетических ресурсов, а также развития передовых энергосберегающих технологий для металлургических предприятий Южно-Уральского региона.

В рамках этой задачи решаются:

- разработка методического, аппаратного и программного обеспечения комплексной системы контроля, планирования и управления потреблением топливных газов и электрической энергии с охватом всех основных технологических процессов, составляющих металлургическое производство в целом;

- разработка программного обеспечения комплексного сетевого моделирования энергетических потоков в технологических процессах, системно составляющих металлургическое производство;

- разработка программного обеспечения решения задач оптимизации параметров технологических процессов в металлургическом производстве по критериям энергетической эффективности с использованием современных методов интеллектуального анализа данных;

- разработка методического, аппаратного и программного обеспечения решения задач мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса технологического оборудования по текущему состоянию на основе методов оптимального распознавания предаварийных ситуаций с минимизацией вероятностей «пропуска аварийной ситуации» и «ложной тревоги»;

- разработка методического и аппаратного обеспечения для решения задач энергетического аудита и электромагнитной совместимости в электроэнергетических и электротехнологических системах.

Решение данных задач позволит создать на приборостроительном факультете научную школу по автоматизации управления энергетическими процессами в энергоемких отраслях промышленности – энергетике и в металлургии.

Работы в данном направлении начались в ЮУрГУ с 1990-х гг. под руководством профессора Казаринова Л.С., при его активном участии в научно-технических программах Челябинской области. Профессор Казаринов Л.С. является автором 3 региональных законов и 4 областных научно-технических программ. Под его научным руководством были разработаны и введены в действие следующие нормативно-правовые акты.

1. Закон Челябинской области «Об энергосбережении и повышении эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в Челябинской области» (1995 г.).

2. Закон Челябинской области «О локальных естественных монополиях» (1997 г.).

3. Постановление Законодательного собрания Челябинской области «О введении услуг энергосервиса населению и организациям бюджетной сферы» (1997 г.).

4. Программа развития и реконструкции топливно-энергетического комплекса Челябинской области до 2005 г. (1998 г.).

5. Программа энергосбережения Челябинской области до 2005 г. (1998 г.).

6. Программа энергосбережения г. Челябинска до 2005 г. (2000 г.).

7. Проект Основных направлений развития энергетики Челябинской области до 2015 г. (2007 г.) и др.

В результате выполнения национального проекта будет создана научно-техническая и нормативно-правовая база развития работ по энерго- и ресурсосбережению Челябинской области.

Характерной особенностью данного проекта является его системный характер. Системность проекта заключается в том, что повышение энергетической эффективности металлургического производства и электроэнергетики является комплексной междисциплинарной проблемой, связывающей воедино специальные исследования в областях: металлургических технологий, энергетики, автоматизации, управления и экономики.

Реализация проекта позволит на основе новейших разработок и передового опыта ведущих металлургических предприятий организовать учебный процесс по дисциплинам, связанным с энергосбережением и управлением энергопотреблением на промышленных предприятиях, а также по дисциплинам автоматизации технологических процессов в металлургии и энергетике, управления себестоимостью продукции в интегрированных корпоративных системах.

Представленная подпрограмма является базовым звеном в проведении государственной политики энергосбережения на металлургических предприятиях Южно-Уральского региона. Он непосредственно будет реализовываться при координации со стороны Правительства Челябинской области. Экономический эффект от реализации проекта (по ОАО «ММК» до 300 млн м³ природного газа в год) окажет непосредственное влияние на себестоимость промышленной продукции Южно-Уральского региона и повысит ее конкурентоспособность. В настоящее время уже ведутся работы с ведущими металлургическими предприятиями Урала: ОАО «ММК», ОАО «Мечел», ОАО «Ашинский металлургический комбинат», ОАО «ЧЭМК», ОАО «Кузнецкие ферросплавы» и др.

Основными результатами предлагаемой подпрограммы будут:

- внедрение передового опыта, полученного учеными ЮУрГУ в работах с металлургическими предприятиями, а также электроэнергетикой Урала, в образовательные программы;
- организация на базе ЮУрГУ переподготовки специалистов металлургических предприятий и предприятий электроэнергетики Урала и РФ;
- развитие перспективных научно-технических направлений по энергосбережению, управлению энергопотреблением и созданию для металлургических предприятий и предприятий электроэнергетики соответствующего техниче-

ско обеспечения энергосберегающих систем на уровне мировых стандартов.

Масштаб влияния подпрограммы на развитие Российской Федерации определяется тем, что металлургические предприятия в настоящее время потребляют около 14 % топлива и 12 % всего объема вырабатываемой в России электроэнергии и являются более энергоемкой отраслью промышленности. Тиражирование полученных передовых инновационных технологий энергосбережения и управления энергопотреблением в металлургическом производстве позволит экономить до 2000 млн м³ природного газа в год.

Влияние подпрограммы на систему высшего профессионального образования заключается в возможности использования учебных и демонстрационных материалов в вузах Российской Федерации, а также организации переподготовки специалистов ведущих металлургических предприятий не только Южного Урала, но других регионов.

2. Подпрограмма IV «Кадровое и научное обеспечение производства и внедрения интеллектуальных систем индивидуального учета энергоресурсов в жилищно-коммунальном хозяйстве»

В рамках подпрограммы для решения поставленных задач планируется проведение следующих мероприятий: создание Учебно-научного центра для проведения учебных, учебно-исследовательских, научно-исследовательских работ в области разработки и производства интеллектуальных систем индивидуального учета энергоресурсов.

В рамках Учебно-научного центра планируется проведение научных исследований по следующим направлениям:

- разработка технологии массового производства кварцевых термочувствительных датчиков на основе технологии управляемого выращивания кварцевых пластин с нужной кристаллической структурой;
- разработка технологии получения особо чистого кварцевого стекла из природного кварца;
- разработка и освоение технологии напыления тонких пленок с использованием мощных наносекундных электромагнитных импульсов;
- разработка микрочипа для измерения температуры на основе МЕМС технологии с беспроводной передачей энергии питания для микрочипа и беспроводной передачей информации с него;
- разработка технологии и организация массового производства однослойных и многослойных печатных плат;
- разработка антенн для обеспечения беспроводной передачи информации; исследование распространения радиоволн, излучаемых датчиком температур, внутри домов и квартир;
- создание перспективных образцов устройств цифровой обработки сигналов и передачи

информации в интеллектуальных системах индивидуального учета энергоресурсов;

- разработка организации обмена данными в беспроводных сетях;
- разработка микроконтроллера комплексного учета энергоресурсов.

Предполагается включение полученных результатов в курсы: «Микросенсоры в автономных системах управления», «Моделирование антенн и устройств СВЧ», «Интеллектуальные АСУ ТП», «Идентификация состояния датчиков и исполнительных элементов систем», «Нейросетевые технологии в идентификации состояния элементов систем и технологических процессов», «Информационно-измерительные системы», «Цифровые и микропроцессорные измерительные системы», «Датчики физических величин», а также:

- модернизация учебных планов по специальностям: «Физическая электроника», «Информационно-измерительная техника и технология», «Радиотехника», «Средства связи с подвижными объектами», «Комплексная защита объектов информатизации», «Автоматизированные системы обработки информации и управления», «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и направлениям «Приборостроение», «Телекоммуникации»;

- модернизация читаемых курсов: «Моделирование антенн и устройств СВЧ», «Информационно-измерительные системы», «Цифровые и микропроцессорные измерительные системы», «Датчики физических величин», «Интеллектуальные АСУ ТП», «Микросенсоры в автономных системах управления»;

- разработка новых курсов: «Физические основы нанoeлектроники», «Основы микросистемной техники и технологии», «Методы формирования наноструктур», «Моделирование наноструктур», «Получение монокристаллов и материалов для микroeлектроники», «Антенны интеллектуальных датчиков», «Технические средства охраны», «Инженерно-техническая защита информации», «Программно-аппаратная защита информации», «Технические средства защиты информации», «Защита информационных процессов в компьютерных системах», «Сетевые информационные технологии», «Цифровая обработка сигналов в интеллектуальных системах индивидуального учета энергоресурсов», «Цифровые системы передачи информации и связи», «Микропроцессорные устройства в интеллектуальных системах индивидуального учета энергоресурсов», «Автоматизация подготовки производства», «Основы микросистемной техники и технологии», «Микропроцессоры и интеллектуальные датчики»;

- внедрение в образовательный процесс гибкой модульной системы, в том числе с использованием элементов дистанционного обучения, создание междисциплинарных модулей «Принципы самодиагностики датчиков и исполнительных элементов», «Алгоритмы самодиагностики датчиков и исполни-

тельных элементов», «Интерфейсы интеллектуальных АСУ ТП», «Архитектура систем Fieldbus». Издание в мультимедийном варианте методических материалов для каждого модуля (УМК);

- разработка и внедрение учебных планов по специальности «Информационно-измерительная техника и технология» и направлению «Приборостроение» в кредитно-модульном представлении с использованием Европейской системы взаимозачета зачетных единиц;

- внедрение балльно-рейтинговой системы в оценку знаний студентов по дисциплинам специальностей: «Физическая электроника», «Микroeлектронные системы», «Информационно-измерительная техника и технология», «Радиотехника», «Средства связи с подвижными объектами», «Комплексная защита объектов информатизации», «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и направлениям «Приборостроение», «Телекоммуникации»;

- введение в учебный процесс научно-исследовательской работы по основным направлениям развития науки, техники и технологий, обеспечивающей принципы и навыки проведения научно-исследовательской работы в рамках дисциплин: «Физические основы нанoeлектроники», «Основы микросистемной техники и технологии», «Методы формирования наноструктур», «Получение монокристаллов и материалов для микroeлектроники», «Комплексная защита и цифровая обработка информации в интеллектуальных системах», «Моделирование антенн и устройств СВЧ», «Микросенсоры в автономных системах управления»;

- разработка и чтение с элементами иностранного языка курсов «Автоматизированные управляющие системы» и «Современные системы автоматизации» для обеспечения академической мобильности преподавателей и студентов;

- создание электронного учебника «Архитектура интеллектуальных АСУ ТП» и электронных учебных пособий: «Моделирование наноструктур», «Характеристики малогабаритных антенн интеллектуальных датчиков», «Система управления с распределенным интеллектом «Delta V», «Методы самодиагностики состояния датчиков и исполнительных элементов», «Технические средства охраны», «Защита информационных процессов в компьютерных системах», «Сетевые информационные технологии», «Цифровая обработка сигналов в интеллектуальных системах индивидуального учета энергоресурсов», «Цифровые системы передачи информации и связи», «Схемотехника и программирование микроконтроллеров»;

- использование в учебном процессе по дисциплинам: «Физические основы нанoeлектроники», «Получение монокристаллов и материалов для микroeлектроники», «Распространение волн в зданиях», «Микроволновые системы», «Организация ЭВМ и систем», «Микропроцессорные и микроконтроллерные системы управления» программных пакетов

«LabView», «MATLAB 7.0», «Simulink Control Design 1.2»), в том числе с использованием кластера и методов параллельных вычислений, а также баз данных и электронных библиотек;

- чтение лекций с использованием мультимедийной технологии по всем курсам специальностей: «Микроэлектронные системы», «Информационно-измерительная техника и технология» и направления «Приборостроение», курсам: «Специальные главы физики», «Техническая электродинамика», «Проектирование антенн и устройств СВЧ», «Информационные технологии в проектировании РЭС», «Технические средства охраны», «Программно-аппаратная защита информации», «Технические средства защиты информации», «Организация ЭВМ и систем», «Системы управления реального времени», «Микропроцессорные системы управления».

В рамках подпрограммы планируется создание современной лабораторной базы для проведения занятий со студентами и выполнения научно-исследовательской работы, в том числе:

- создание и оснащение автоматизированным оборудованием и программным обеспечением учебных лабораторий по специальностям «Информационно-измерительная техника и технология», «Автоматика и управление в технических системах», «Автоматизированные системы обработки информации и управления»; направлению «Приборостроение» в рамках курсов «Интеллектуальные датчики систем управления», «Архитектура АСУ ТП с распределенным интеллектом», «Самодиагностика датчиков и исполнительных элементов»;

- создание и оснащение автоматизированным оборудованием и программным обеспечением лабораторий для проведения учебных, учебно-исследовательских, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области создания и производства интеллектуальных систем индивидуального учета энергоресурсов: датчиков и микросенсоров; технологии изготовления кварцевых датчиков; технологии получения кварцевого стекла; контроля свойств и качества кварцевых материалов; технологии изготовления микрочипов и многослойных печатных плат; цифровых устройств передачи информации, обработки информации и управления; датчиков физических величин; самодиагностики датчиков и исполнительных элементов; АСУ ТП с распределенным интеллектом.

В результате проведения научных исследований будут разработаны:

- основы технологии массового производства кварцевых термочувствительных датчиков – 2008 г.;
- основы технологии получения особо чистого кварцевого стекла из природного кварца – 2008 г.;
- микрочип для измерения температуры на основе МЕМС технологии – 2008 г.;
- технология и организовано массовое производство однослойных и многослойных печатных плат – 2008 г.;

- антенны для обеспечения беспроводной передачи информации – 2007 г.;

- модели процессов распространения радиоволн, излучаемых датчиком температур, внутри домов и квартир – 2008 г.;

- перспективные образцы устройств цифровой обработки сигналов и передачи информации в интеллектуальных системах индивидуального учета энергоресурсов – 2007 г.;

- технология организации обмена данными в беспроводных сетях – 2008 г.

Информация, полученная в результате проведенных исследований и разработок, будет включена в рабочие программы дисциплин: «Физические основы нанозлектроники» (2008 г.); «Моделирование наноструктур» (2008 г.); «Получение монокристаллов и материалов для микроэлектроники» (2008 г.); «Датчики физических величин» (2007 г.); «Интеллектуальные АСУ ТП» (2007 г.); «Идентификация состояния датчиков и исполнительных элементов систем» (2008 г.); «Информационно-измерительные системы» (2008 г.); «Цифровые и микропроцессорные измерительные системы» (2008 г.).

Масштабность результатов реализации образовательной подпрограммы определяется следующими цифрами: в России в настоящее время потенциальными объектами для внедрения систем учета являются дома с общей площадью около 800 млн м² (28 % всего жилого фонда). В этих домах проживает 38,5 млн человек. Переход на индивидуальные системы учета экономит до 32 % холодной воды и 23 % – горячей. После экономия воды составит около 1,2 млрд м³, или 10,6 млрд руб. Экономия тепловой энергии на подогрев воды и отопление составит около 45 млн Гкал, или 14,3 млрд руб.

При ежегодном строительстве 50 млн м² жилья и установкой в нем систем учета годовая экономия воды составит 75 млн м³, или 660 млн руб., а экономия тепловой энергии 2,8 млн Гкал, или 891 млн руб.

Системность подпрограммы заключается во взаимосвязи дисциплин, лежащих в основе микроэлектронной и микросистемной техники, базирующейся на сочетании фундаментальных и прикладных дисциплин, а также инновационных технологий в комплексном учете всех энергетических параметров.

Реализация образовательной подпрограммы позволит на основе новейших разработок организовать учебный процесс в ЮУрГУ в области интеллектуальных систем индивидуального учета энергоресурсов и других интеллектуальных измерительных и управляющих систем на мировом уровне и распространить его не только на вузы Уральского Федерального округа, но и на другие вузы.

Представленная образовательная подпрограмма является новым комплексным подходом к решению национальной задачи России – экономии энергоресурсов путем вовлечения потребителя в процесс экономии.

Поступила в редакцию 28 апреля 2008 г.

ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ С ПРОГНОЗОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер

Рассматриваются модели и методы оперативного управления технологическими процессами (ТП) с прогнозом текущих значений показателей энергетической эффективности, предложена схема системы оперативного управления ТП с контуром оптимального управления по показателям энергетической эффективности, имеющая достаточно общий характер, позволяющая оптимизировать режимы ТП широкого класса.

Ключевые слова: оперативное управление, технологические процессы, энергетическая эффективность, прогноз показателей.

Автоматизированные системы мониторинга и управления технологическими процессами (ТП) играют ключевую роль в повышении эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) [1–3]. В настоящее время данный класс автоматизированных систем управления строится на основе распределенных вычислительных сетей, оснащенных на нижнем уровне датчиками параметров режимов ТП, интегрированных на верхнем уровне в корпоративные системы предприятий [3]. Несмотря на большие успехи, достигнутые в настоящее время при построении АСУ ТП, существует целый ряд нерешенных проблем, связанных непосредственно с оперативным управлением экономичностью ТП. Дело в том, что в рамках АСУ хорошо решены задачи, связанные с непрерывным мониторингом параметров режимов и диспетчеризацией режимов ТП. Задачи же управления экономичностью ТП решаются в основном на основе обработки статистики, поэтому носят неоперативный характер. Отсутствие информации о текущих значениях показателей энергетической эффективностью управляемых процессов снижает эффективность управления ими. Поэтому актуальна задача разработки моделей и методов оперативного управления ТП с прогнозом текущих значений показателей энергетической эффективности.

Базовыми показателями эффективности ТП являются следующие:

- прямой показатель энергетической эффективности – количество выпущенной продукции, соотнесенной на единицу затраченных энергетических ресурсов

$$\varphi^{\text{cp}} = P^{\text{cp}} / W^{\text{cp}}; \quad (1)$$

- инверсный показатель – энергоемкость выпускаемой продукции

Казаринов Лев Сергеевич – д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ, заведующий кафедрой автоматики и управления ЮУрГУ; kazarinov@ait.susu.ac.ru.

Шнайдер Дмитрий Александрович – к.т.н., доцент кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; shnyder@ait.susu.ac.ru.

$$\omega^{\text{cp}} = W^{\text{cp}} / P^{\text{cp}}. \quad (2)$$

Здесь P^{cp} – средний объем выпущенной продукции за период наблюдения; W^{cp} – средний объем потребленных ТЭР за период наблюдения.

Средний объем потребленных ТЭР определяется по формуле:

$$W^{\text{cp}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i u_i^{\text{cp}}, \quad (3)$$

где u_i^{cp} – среднее значение i -го потребленного ресурса; α_i – переводной коэффициент к единой размерности объема потребляемого ресурса (обычно тонн условного топлива).

Используемый оператор усреднения, используемый в формулах (1)–(3) обычно имеет вид:

$$(\cdot)^{\text{cp}} = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} (\cdot) dt, \quad (4)$$

где T_n – интервал наблюдения.

Недостаток соотношений (1)–(4) состоит в том, что они дают усредненные значения показателей эффективности за определенный период наблюдения, в то время как для оперативного управления, целесообразно знать текущие значения показателей эффективности.

При этом непосредственное использование формул (1)–(3) не позволяет оценивать показатели в реальном времени, так как они ориентированы на решение задач статистической отчетности. Применение же этих формул для оценки текущих показателей эффективности приводит к некорректной постановке задачи оценки, при которой отклонения в исходных данных вызывают большие отклонения оцениваемых показателей.

Действительно, подача импульса ТЭР на вход технологического объекта управления (ТОУ) не приводит к мгновенному изменению выпускаемой продукции на выходе, вследствие инерционности ТП. Поэтому расчет по формулам (1)–(3) при подаче импульса ТЭР будет показывать резкое ухудшение эффективности технологического процесса в начальный период, что в общем случае не соответ-

ствует действительности. Реальная же ситуация состоит в том, что импульс ТЭР вследствие инерционности ТП «не дошел» еще до выхода. Поэтому для корректного вычисления текущей оценки показателей эффективности необходимо осуществить динамическое приведение импульса ТЭР на входе ТООУ к его выходу. Для динамического приведения можно использовать переходные функции по импульсу ТЭР на объем выходной продукции.

Предположим, что для импульсов по видам ТЭР $\{\Delta u_i\}$ получено множество переходных функций $\{h_i(t)\}$. Тогда оператор динамического приведения i -го импульса к выходу объекта будет иметь вид:

$$\Delta u_i^{np}(t) = \int_0^{\infty} \Delta u_i(t-\lambda) dh_i^h(\lambda), \quad i=1, \dots, n, \quad (5)$$

где h_i^h – i -я нормированная переходная функция.

Нормированные переходные функции вычисляются по формулам:

$$h_i^h(t) = h_i(t)/h_i(\infty). \quad (6)$$

Формула (5) характеризует условную динамику «прохождения» импульса ТЭР на выход ТООУ при условии отсутствия потерь ТЭР.

Соотношение (5) справедливо для линеаризованных стационарных динамических систем и представляет собой вид реакции стационарной динамической системы на входное воздействие.

Используя операции динамического приведения, можно рассчитать текущий объем потребляемых ТЭР, приведенных к выходу ТООУ:

$$\Delta W^{np}(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta u_i^{np}(t), \quad (7)$$

где $\Delta W^{np}(t)$ – приращение импульса потребляемых ТЭР.

В этом случае показатели эффективности ТП (1), (2) формулируются в виде:

$$\varphi^{(-)}(t) = P(t)/W^{np}(t); \quad (8)$$

$$\omega^{(-)}(t) = W^{np}(t)/P(t), \quad (9)$$

где $W^{np}(t) = W^6 + \Delta W^{np}(t)$, W^6 – базовое значение потребляемых ТЭР.

Оценки показателей энергетической эффективности ТП в соответствии с формулами (8), (9) являются запаздывающими. Для цели оперативного управления необходимо иметь прогнозные оценки показателей эффективности.

Для вычисления прогнозных оценок показателей эффективности воспользуемся идеей динамического приведения импульса ТЭР на входе ТООУ к его выходу, но в инверсном смысле – динамического приведения импульса выпуска продукции на выходе ко входу ТООУ.

Обратная задача динамического приведения импульса выпуска продукции на выходе ко входу ТООУ может быть выполнена на основе решения интегрального уравнения:

$$\int_0^{\infty} \Delta P^{np}(t-\lambda) dh_p^h(\lambda) = \Delta P(t). \quad (10)$$

Здесь $\Delta P(t)$ – текущее приращение объема выпуска продукции; $\Delta P^{np}(t)$ – приращение приведенного значения объема выпуска продукции ко входу ТООУ; $h_p^h(t)$ – агрегированная нормированная переходная функция по суммарному импульсу ТЭР $\Delta W(t)$ на входе ТООУ.

Нормирование переходной функции $h_p^h(t)$ происходит по формуле

$$h_p^h(t) = h_p(t)/h_p(\infty). \quad (11)$$

Исходным уравнением при выводе формулы (10) является уравнение реакции ТООУ на импульсы ТЭР на его входах:

$$\Delta P(t) = \sum_{i=1}^n \int_0^{\infty} \Delta u_i(t-\lambda) dh_i(\lambda), \quad i=1, \dots, n. \quad (12)$$

Эквивалентные преобразования уравнения (12) осуществляется на основе соотношений:

- перевода объема потребленного топлива из натуральных показателей в условное топливо:

$$u_i^{y,t} = \alpha_i u_i, \quad i=1, \dots, n; \quad (13)$$

- долевой составляющей i -го вида ТЭР в объем P выпускаемой продукции:

$$u_i^{y,t} = \omega_i^6 P, \quad i=1, \dots, n, \quad (14)$$

где ω_i^6 – базовая энергоемкость выпускаемой продукции по i -му виду ТЭР.

В результате агрегированная переходная функция ТООУ будет иметь вид:

$$h_p(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i^6 / \alpha_i h_i(t). \quad (15)$$

На основе решения уравнений (10) в реальном времени можно оценить прогнозные значения показателей энергетической эффективности:

$$\varphi^{(+)}(t) = P^{np}(t)/W(t); \quad (16)$$

$$\omega^{(+)}(t) = W(t)/P^{np}(t). \quad (17)$$

Рассмотрим условия эквивалентности определения текущих показателей эффективности ТП и средних показателей (1), (2). С этой целью будем полагать, что

$$W^{cp} = W^6 + \Delta W^{cp}; \quad (18)$$

$$P^{cp} = P^6 + \Delta P^{cp}; \quad (19)$$

$$W^{np}(t) = W^6 + \Delta W^{np}(t); \quad (20)$$

$$P(t) = P^6 + \Delta P(t), \quad (21)$$

где P^6 – базовое значение объема выпущенной продукции; W^6 – базовое значение объема потребленных ТЭР; ΔP^{cp} – отклонение среднего значения объема выпущенной продукции от соответствующего базового значения; ΔW^{cp} – отклонение среднего значения объема потребленных ТЭР от соответствующего базового значения; ΔP – отклонение текущего значения объема выпущенной продукции от соответ-

ствующего базового значения; ΔW^{np} – отклонение текущего значения приведенного объема потребленных ТЭР от соответствующего базового значения.

С учетом (18)–(21) отклонения показателей эффективности от базовых значений будут определяться по следующим аналитическим соотношениям:

$$\Delta \varphi = (\Delta P - \varphi^6 \Delta W)(W^6)^{-1}; \quad (22)$$

$$\Delta \omega = (\Delta W - \omega^6 \Delta P)(P^6)^{-1}, \quad (23)$$

где φ^6 – базовое значение прямого показателя эффективности ТП; ω^6 – базовое значение энергоемкости ТП. Применяя (4) к (22), (23), получим

$$\Delta \varphi^{cp} = (\Delta P^{cp} - \varphi^6 \Delta W^{cp})(W^6)^{-1}; \quad (24)$$

$$\Delta \omega^{cp} = (\Delta W^{cp} - \omega^6 \Delta P^{cp})(P^6)^{-1}. \quad (25)$$

Для текущих значений отклонений показателей эффективности (8), (9) получим соотношения:

$$\Delta \varphi^{(-)}(t) = (\Delta P(t) - \varphi^6 \Delta W^{np}(t))(W^6)^{-1}; \quad (26)$$

$$\Delta \omega^{(-)}(t) = (\Delta W^{np}(t) - \omega^6 \Delta P(t))(P^6)^{-1}. \quad (27)$$

Применим операцию усреднения к (26), (27):

$$\Delta \varphi^{cp} = (\Delta P^{cp} - \varphi^6 (\Delta W^{np})^{cp})(W^6)^{-1}; \quad (28)$$

$$\Delta \omega^{cp} = ((\Delta W^{np})^{cp} - \omega^6 \Delta P^{cp})(P^6)^{-1}. \quad (29)$$

Для равенства соотношений (24), (25) и (28), (29) необходимо, чтобы

$$(\Delta W^{np})^{cp} = \Delta W^{cp}. \quad (30)$$

Можно показать, если для динамического приведения (5) использовать переходные функции, нормированные по формуле (6), то $\lim_{T_n \rightarrow \infty} (\Delta W^{np})^{cp} = \Delta W^{cp}$. Таким образом, соотношения (5) и (30) определяют условия динамического приведения входных процессов потребления ТЭР к выходу ТОО.

Аналогичным образом можно показать, что условиями динамического приведения (10) выходного ТП производства продукции ко входу ТОО является условие:

$$(\Delta P^{np})^{cp} = \Delta P^{cp}. \quad (31)$$

Условие (31) выполняется при нормированной переходной функции (11).

Вычисление прогнозной оценки на основе решения уравнения (10) могут представлять серьезные вычислительные трудности. Особенно это относится к ТОО с запаздывающими динамическими процессами. В этих случаях целесообразно использовать упреждающие оценки показателей эффективности.

Упреждающие оценки показателей эффективности можно построить на основе введения такта запаздывания τ при построении оценок.

В этом случае осуществляется частичное динамическое приведение процессов подачи ТЭР на входе объекта с задержкой на такт запаздывания τ :

$$\Delta u_i^{np}(t) = \frac{1}{A} \int_0^\tau \Delta u_i(t-\lambda) d h_i(\lambda), \quad i=1, \dots, n, \quad (32)$$

где A – коэффициент нормирования: $A = h(\tau)$.

Для процесса выработки продукции $P(t)$ также осуществляется частичное динамическое приведение с интервалом прогноза $(T_p - \tau)$, где T_p – время переходного процесса по агрегированной переходной функции $h_p(t)$. В этом случае осуществляется решение уравнения

$$\int_\tau^\infty \Delta P^{np}(t-\lambda) d h_p^H(\lambda) = \Delta P(t). \quad (33)$$

Упреждающие оценки показателей энергетической эффективности определяются на основе соотношений:

$$\varphi^{(+)}(t) = P^{np}(t) / W^{np}(t); \quad (34)$$

$$\omega^{(+)}(t) = W^{np}(t) / P^{np}(t). \quad (35)$$

Выбор такта запаздывания τ осуществляется из условий разрешимости уравнения (33), а также эффективности процесса оперативного управления.

Для решения уравнения (10) в реальном времени можно также воспользоваться процедурой регуляризации.

В этом случае уравнение (10) имеет вид

$$\int_0^\infty \Delta P^{np}(t-\lambda) d h_p^H(\lambda) + K_R^{-1} \Delta P^{np}(t) = \Delta P(t), \quad (36)$$

где K_R^{-1} – коэффициент регуляризации.

Уравнение (36) можно интерпретировать как систему автоматического регулирования. Структура указанной системы регулирования представлена на рис. 1.

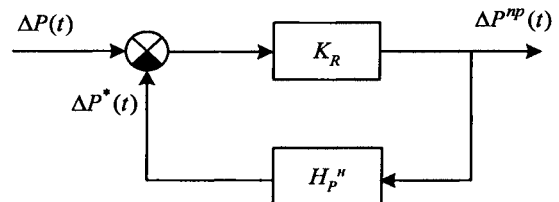


Рис. 1. Структура системы регулирования

Здесь H_p^H – передаточная функция, соответствующая переходной функции $h_p(t)$.

Схему на рис. 1 можно рассматривать как структуру прогнозирующего фильтра, вычисляющего прогнозные оценки $\Delta P^{np}(t)$ по результатам измерений $\Delta P(t)$. Интерпретация прогнозирующего фильтра (рис. 1) как системы регулирования с обратной связью позволяет применить весь арсенал средств обеспечения качества процессов регулирования, разработанный в рамках теории автоматического управления, для синтеза указанного фильтра.

Построенные оценки текущих значений показателей эффективности ТП могут быть использованы в системах автоматизированного мониторинга для оперативного контроля энергетической эффективности технологических процессов.

Рассмотрим задачу текущей оптимизации режимов ТП. Рабочие характеристики ТП будем представлять в виде:

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ЦЕХА

Л.А. Копцев, Ю.П. Журавлев

В статье рассматриваются подходы к управлению энергетической эффективностью электросталеплавильного цеха, приводятся эмпирические зависимости, позволяющие оптимизировать энергобаланс дуговой сталеплавильной печи при прогнозируемых изменениях стоимости входящих в него энергоресурсов.

Ключевые слова: электросталеплавильный цех, дуговая сталеплавильная печь, энергобаланс, энергетическая эффективность.

Металлургические предприятия являются наиболее крупными потребителями энергоресурсов. Затраты на обеспечение энергоресурсами составляют значительную долю себестоимости производства, при этом повышение качественных показателей и потребительских свойств продукции, снижение её себестоимости являются важнейшими приоритетами деятельности металлургических предприятий. В то же время повышение качественных показателей продукции может быть обеспечено только за счёт дополнительного потребления энергоресурсов соответствующими новыми агрегатами без увеличения объёмов продукции, что ведёт к повышению показателя её энергоёмкости. И вместе с тем, удельная энергоёмкость продукции остаётся показателем эффективности использования энергоресурсов на предприятиях и относится к основным показателям эффективности их деятельности. Снижение энергоёмкости продукции и финансовых затрат на обеспечение энергоресурсами (что зачастую не совпадает) является одной из основ выживания предприятий, поскольку в значительной степени определяет их конкурентоспособность.

Очень существенное влияние на изменение энергоёмкости продукции металлургического предприятия оказывает ввод в работу принципиально новых основных технологических агрегатов. Происходит это в силу многих причин: изменения структуры потребляемых энергоресурсов, перераспределения потоков сырья и промежуточной продукции, слабой загрузки нового оборудования на первых порах в силу его неосвоенности персоналом и других.

В апреле 2006 г. в ОАО «ММК» введена в работу дуговая сталеплавильная печь (ДСП) ёмкостью 185 т и образован электросталеплавильный цех. В сентябре того же года заработала вторая ДСП. В настоящее время в составе цеха имеются две ДСП, двухвальный сталеплавильный агрегат

(ДСА), четыре агрегата внепечной обработки и три машины непрерывной разливки стали. Динамика затрат энергоресурсов на производство стали электросталеплавильным цехом в целом с учётом затрат предыдущих переделов (известково-доломитовое, горно-обогащительное и коксохимическое производства, выплавка чугуна) помесечно в 2006 г. (с момента ввода в работу первой ДСП) приведена на рис. 1. Диаграмма отражает значительный рост потребления энергоресурсов собственно электросталеплавильным цехом к концу года, что естественно в связи с ростом выплавки стали.

Динамика удельных затрат энергоресурсов на выплавку тонны стали электросталеплавильным цехом (ЭСЦ) с учётом затрат предыдущих переделов за тот же период приведена на рис. 2. Из последней диаграммы очевидно, что энергоёмкость выплавки стали электродуговым способом (ноябрь–декабрь – 4,4–4,7 ГДж/т) в 1,5 раза выше, чем мартеновским с кислородной продувкой (апрель – 3,0 ГДж/т), но при этом затраты энергоресурсов на весь цикл получения тонны стали с учётом предыдущих переделов снижаются в 1,8 раза – на 8,4 ГДж/т. Объясняется это явление значительно меньшей долей чугуна в загрузке ДСП по сравнению с долей чугуна в загрузке ДСА, а именно производство чугуна определяет 60 % энергоёмкости стали на металлургическом предприятии полного цикла.

Основной объём стали в ОАО «ММК» выплавляется конвертерным способом. Для сравнения на рис. 3 приведена динамика удельных затрат энергоресурсов на выплавку тонны стали кислородно-конвертерным цехом (ККЦ) с учётом затрат предыдущих переделов за тот же период. Сравнение удельных расходов энергоресурсов на выплавку стали в этих двух цехах указывает на то, что энергоёмкость всего цикла производства стали в ЭСЦ (10,3 ГДж/т) почти на 43 % ниже, чем в ККЦ (18,3 ГДж/т). Решающим фактором и в этом случае является соотношение долей жидкого чугуна в загрузке ДСП и конвертера в соответствии с требованиями организации технологического процесса. При этом удельные затраты энергоресурсов собственно ЭСЦ (4,53 ГДж/т) оказываются в 3,57 раза выше, чем конвертерного цеха (1,27 ГДж/т).

Копцев Леонид Алексеевич – к.т.н., начальник лаборатории анализа и управления энергоресурсами ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»; lak_energo@mmk.ru.

Журавлев Юрий Петрович – главный энергетик ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»; jur@mmk.ru.

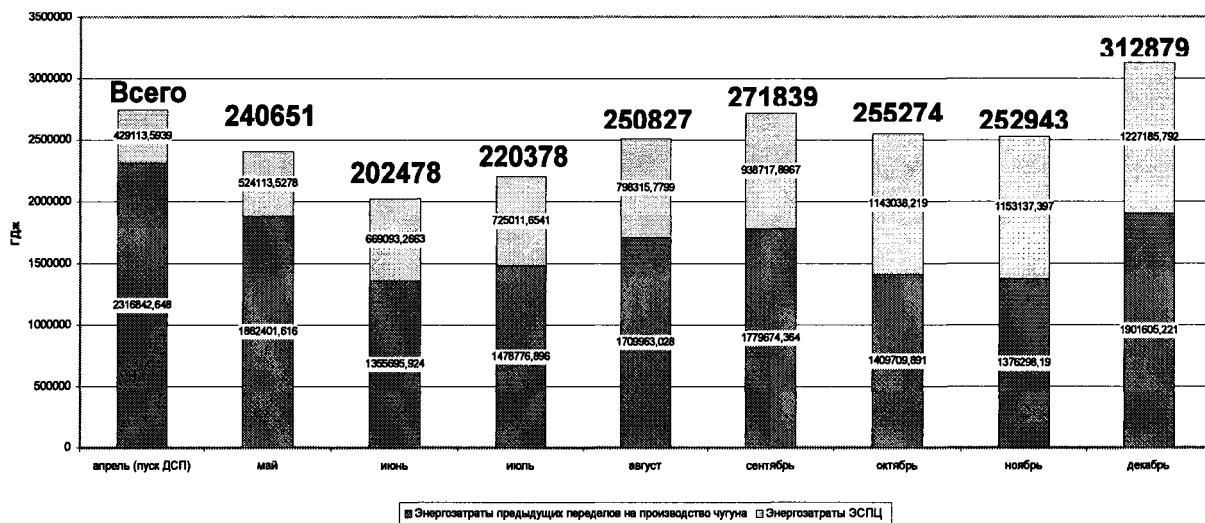


Рис. 1. Структура энергозатрат на производство стали ЭСПЦ в 2006 г.

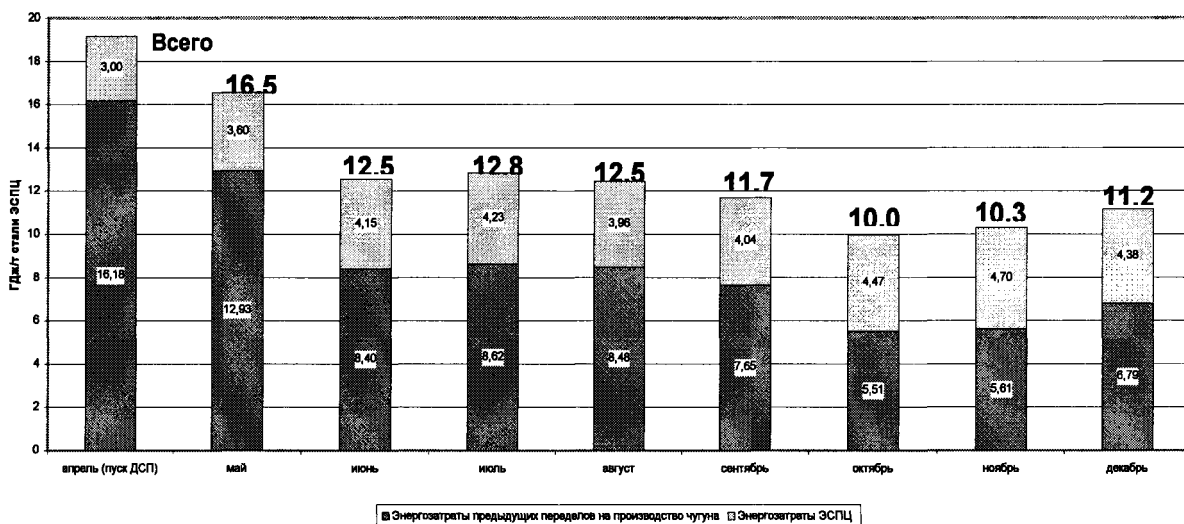


Рис. 2. Структура удельных энергозатрат на производство стали ЭСПЦ в 2006 г.

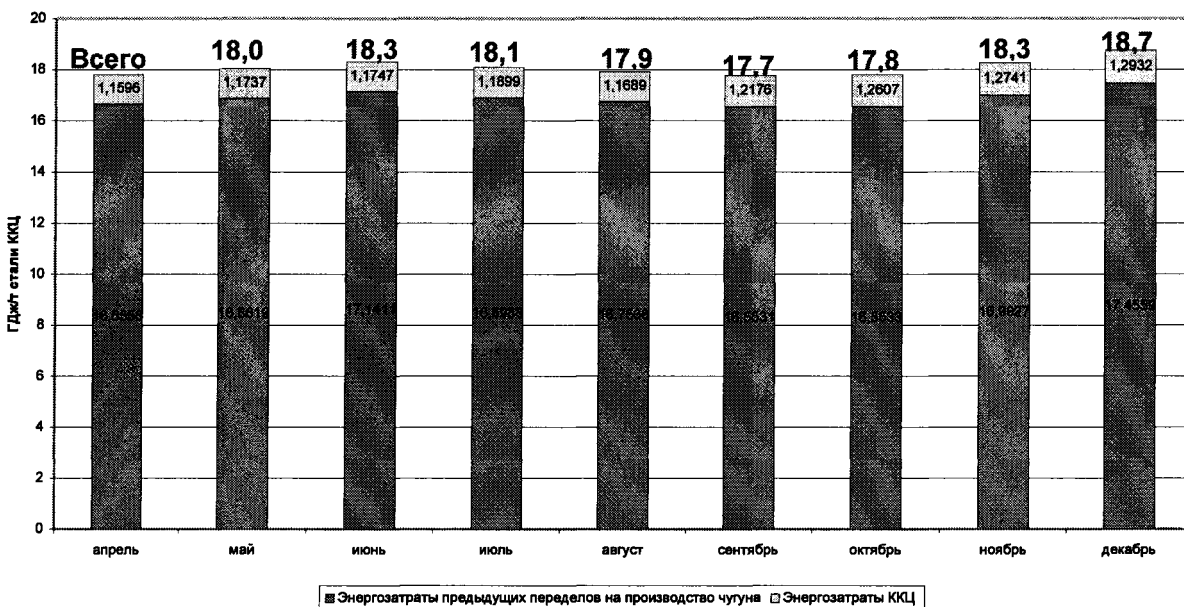


Рис. 3. Структура удельных энергозатрат на производство стали ККЦ в 2006 г.

Нарастание объёмов выплавки стали в ЭСПЦ по мере освоения оборудования определило снижение энергоёмкости продукции комбината с 6,52 Гкал/т стали в 2005 г. до 5,98 Гкал/т стали в 2006 г. Динамика снижения энергоёмкости продукции комбината ежемесячно в 2006 г. приведена на рис. 4. Наиболее значимыми факторами в этом процессе являются, конечно, собственно нарастание объёмов выплавки стали и среднее снижение доли чугуна при выплавке стали. Косвенной количественной характеристикой последнего фактора может быть принято соотношение выплавки чугуна и стали на комбинате в целом: в 2005 г. этот показатель составил 848 кг/т, а в 2006 г. снизился до 781,4 кг/т в среднем по году.

Общее снижение энергоёмкости продукции комбината за счёт повышения загрузки ЭСПЦ целесообразно закрепить и усилить снижением удельных затрат энергоресурсов непосредственно в цехе за счёт освоения оборудования и совершенствования энергобаланса цеха, не забывая при этом о стоимости различных энергоресурсов и необходимости снижения энергозатрат, то есть финансовых затрат на обеспечение основного производства энергоресурсами. Динамика потребления энергоресурсов электросталеплавильным цехом в целом, с учётом физического тепла жидкого чугуна, в 2006 г. (с момента ввода в работу первой ДСП) приведена на рис. 5.

Динамика изменения удельного расхода энергоресурсов (включая физическое тепло жидкого чугуна) электросталеплавильным цехом в целом на тонну выплавляемой в цехе стали за тот же период приведена на рис. 6. В удельных затратах энергоресурсов, а более точно, в энергоёмкости технологического процесса ЭСПЦ (на примере ноября) электроэнергия составляет наиболее крупную долю – 60,3 %, природный газ – 16,4 %, кислород – 9,1 %. Эти энергоресурсы используются в технологическом процессе выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах. Доля физического тепла жидкого чугуна в структуре удельных затрат энергоресурсов ЭСПЦ с 24,8 % в апреле снизилась до 6,6 % в ноябре. Необходимо отметить, что в данных, использованных для построения диаграмм на рис. 1–3, физическое тепло жидкого чугуна, во избежание двойного счёта, не учитывается, поскольку оно определяется потреблением первичных энергоресурсов (природного газа, коксующегося угля) при выплавке чугуна. Расчёты проведены на основе методики сквозного энергетического анализа [1], применяемой в ОАО «ММК» для мониторинга энергоёмкости продукции комбината с 1996 г.

В процессах плавления и доводки в ДСП используются три энергоресурса: электрическая энергия, природный газ и кислород. Основную долю энергии, необходимой для расплавления шихтовых материалов и доводки расплава, в печь вносит, как видно из диаграммы на рис. 6, электроэнергия. Кроме того, значительную долю в

энергобалансе ДСП составляет физическое тепло жидкого чугуна, являющегося частью загрузки печи. Двухванный сталеплавильный агрегат (ДСА) для своей работы потребляет кислород (продувка кислородом обеспечивает основную долю тепловыделения в период плавления), природный газ и пар. Так же существенную долю тепла в ДСА вносит жидкий чугун, тем более что жидкий чугун в загрузке ДСА (как уже говорилось выше) составляет значительно большую долю, нежели в загрузке дуговой печи. Таким образом, электроэнергия, природный газ, кислород и физическое тепло чугуна, составляющие в сумме решающую долю 92,4 % в энергобалансе ЭСПЦ, используются в технологическом процессе различных по принципу действия сталеплавильных агрегатов. Существующая система учёта энергоресурсов внутри цеха не позволяет достоверно выделить доли каждого из основных технологических агрегатов в потреблении перечисленных энергоресурсов в структуре энергобаланса цеха. По соотношению же объёмов выплавки стали между дуговыми печами и ДСА можно сделать вывод, что доля ДСП в энергобалансе ЭСПЦ составляет 75–80 %. Таким образом, в оптимизации работы ДСП могут быть получены наибольшие результаты энергосбережения.

Обычно под энергосбережением подразумевается снижение физических объёмов потребления энергоресурсов предприятием на производство единицы продукции, что ведёт к снижению показателя энергоёмкости. Основными направлениями энергосберегающей деятельности являются повышение эффективности использования энергоресурсов в технологических процессах производства продукции, оптимизация энергобаланса предприятия в целом и отдельных технологических цехов – потребителей энергоресурсов. При этом *важнейшим результатом энергосбережения предполагается снижение энергозатрат*, то есть финансовых затрат на покупку и выработку внутри предприятия энергоресурсов для обеспечения производственных процессов, и в конечном итоге – уменьшение доли энергозатрат в суммарных затратах на производство продукции. Такая постановка задачи заставляет обратить внимание на тот факт, что снижение финансовых затрат на обеспечение энергоресурсами металлургического предприятия иногда сопровождается повышением энергоёмкости продукции.

С этих позиций рассмотрим структуру потребления энергоресурсов непосредственно дуговыми печами. С января 2007 г. организован автоматический учёт энергоресурсов, потребляемых печами, что даёт возможность анализировать энергобаланс ДСП с учётом влияния некоторых технологических, производственных факторов. Динамика удельного энергопотребления ДСП в 2007 г. приведена на рис. 7. При этом динамика структуры энергобаланса ДСП (по энергосодержанию) приведена на рис. 8.

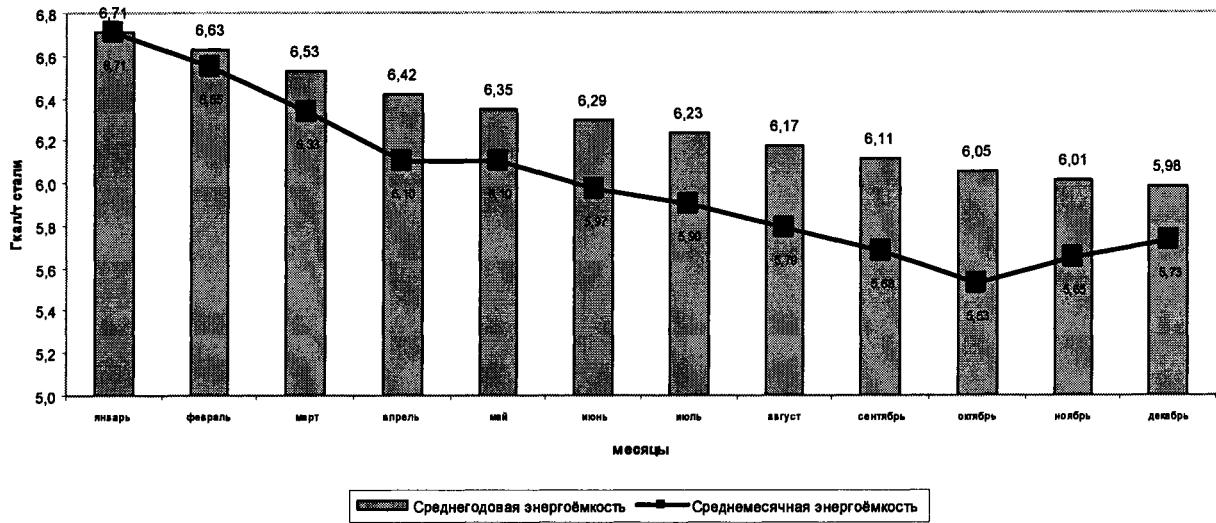


Рис. 4. Динамика энергоёмкости стали ОАО «ММК» в 2006 г.

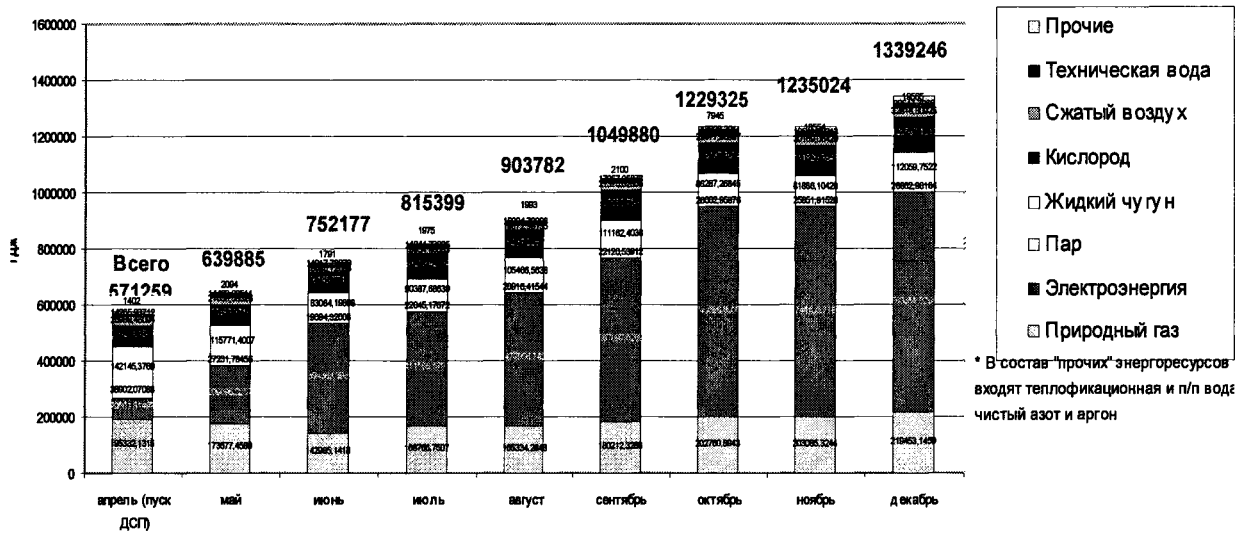


Рис. 5. Структура потребления энергоресурсов и жидкого чугуна ЭСПЦ в 2006 г.

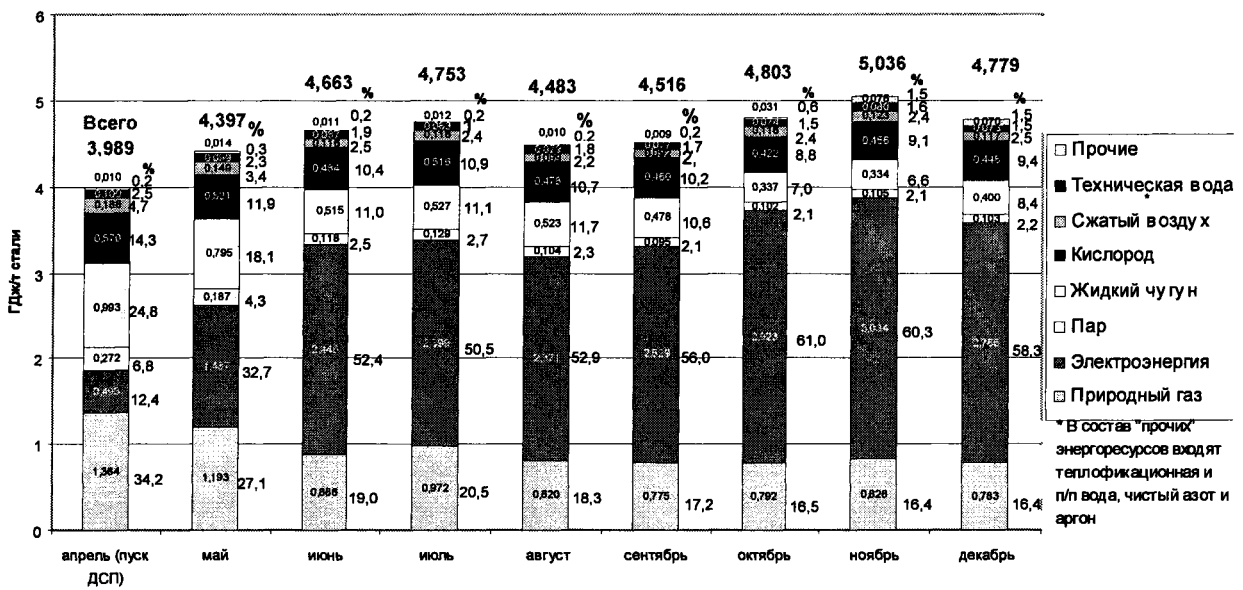


Рис. 6. Структура удельного потребления энергоресурсов и жидкого чугуна ЭСПЦ в 2006 г.

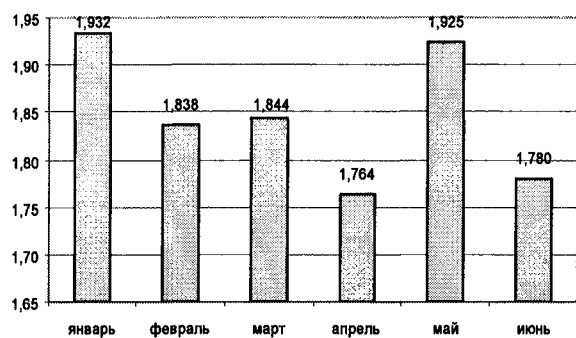


Рис. 7. Удельное энергопотребление ДСП в 2007 г.

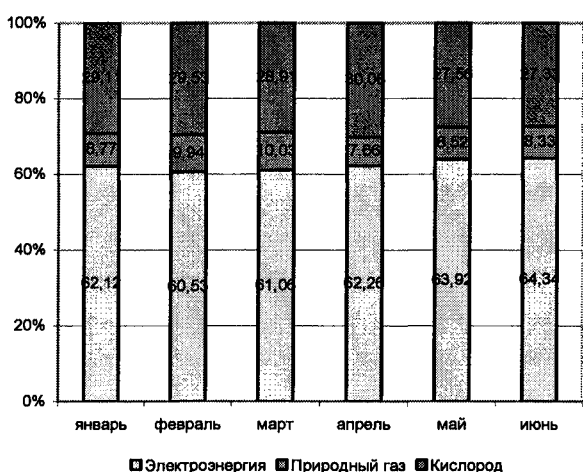


Рис. 8. Энергобаланс ДСП (энергия) в 2007 г.

Необходимо отметить, что при построении диаграмм на рис. 7, 8 и последующих учитываются данные об объемах потребления только электроэнергии, природного газа и кислорода, используемых для осуществления технологического процесса выплавки стали в ДСП (приведение к одним единицам измерения энергии осуществлялось на основе технических коэффициентов эквивалентирования энергоресурсов). Энергосодержание кислорода определялось количеством тепла, выделяющегося при окислении углерода чугуна единицей объема газа. Динамика изменения *удельных энергозатрат*, то есть финансовых затрат на обеспечение перечисленными энергоресурсами технологического процесса ДСП, имеет существенно отличающийся характер и приведена на рис. 9. Структура удельных энергозатрат или энергобаланса ДСП в стоимостном выражении ежемесячно в 2007 г. приведена на рис. 10.

Сопоставление удельного энергопотребления ДСП (см. рис. 7) и удельных энергозатрат (см. рис. 9) для обеспечения технологического процесса в ДСП указывает на слабую коррелированность этих показателей. Безусловно, что на удельное энергопотребление оказывает влияние большое количество режимных технологических и производственных факторов, а также и структура потребления энергоресурсов (см. рис. 8) и их стоимость. Последний фактор кардинально меняет структуру энергобаланса ДСП (см. рис. 10) в случае представ-

ления его в стоимостном выражении. Стоимость энергоресурсов (единицы энергии, руб./ГДж) помещаюно за первую половину 2007 г. приведена на рис. 11. Для повышения наглядности влияния изменений стоимости энергоресурсов на энергозатраты для обеспечения выплавки стали в ДСП приведены *соотношения* стоимости энергоресурсов (на единицу энергии) в 2007 г. по отношению к природному газу (рис. 12) и к стоимости соответствующих энергоресурсов в январе (рис. 13).

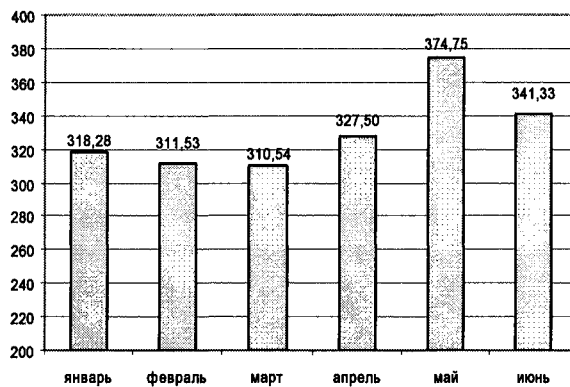


Рис. 9. Удельные энергозатраты ДСП в 2007 г., руб./т стали

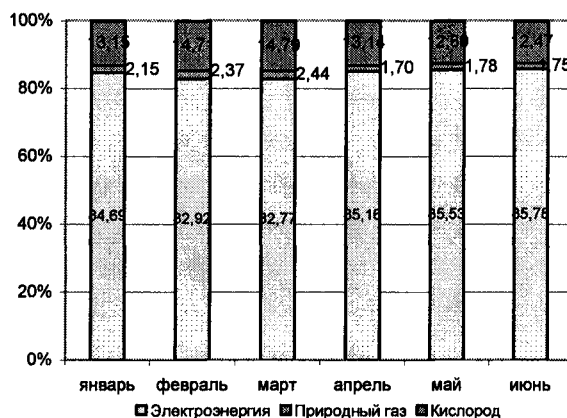


Рис. 10. Энергобаланс ДСП (стоимость) в 2007 г.

Очевидно, что электроэнергия является наиболее дорогим энергоресурсом в пересчете на единицу энергии (см. рис. 12) даже с учетом покрытия части потребности ДСП выработкой электроэнергии на собственных электростанциях ОАО «ММК». Именно это обстоятельство и увеличивает долю электроэнергии в энергобалансе ДСП при его стоимостном представлении. Одновременно стоимость электроэнергии для ДСП очень вариативна: и по сравнению с природным газом, и по отношению к данным января. Доля собственной электроэнергии в потреблении и определяет в наибольшей степени изменения её стоимости для цеха. Однако, стоимость единицы энергии кислорода, при относительно небольшой её величине, характеризуется наибольшим диапазоном изменений (см. рис. 13).

Рассмотрим возможность оптимизации энергобаланса ДСП на основе метода линейного про-

граммирования [2]. Задача решается с целью снижения *энергозатрат* до минимально возможного уровня при соблюдении условия затрат необходимого количества энергоресурсов для обеспечения технологических операций расплавления и доводки металла в печи. В качестве необходимого количества энергии для обеспечения проведения технологических операций принимаем среднюю за месяц величину суммарных удельных затрат энергоресурсов для ДСП. Допущение это вынужденное, с тем чтобы упростить задачу, поскольку очевидно, что необходимо добиваться снижения самой этой величины удельных затрат энергоресурсов, однако это является целью сопряжённой, но всё же другой задачи. Для выражения необходимых удельных затрат энергоресурсов (ГДж/т) получаем следующее уравнение:

$$x_1 k_1 + x_2 k_2 + (x_3 - 2x_2) k_3 = \mathcal{E}_{\min}, \quad (1)$$

где x_1 – удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т; x_2 – удельный расход природного газа, м³/т; x_3 – удельный расход кислорода, м³/т; k_1, k_2, k_3 – переводные коэффициенты к общим единицам измерения энергии, соответственно, электроэнергии, природного газа и кислорода; \mathcal{E}_{\min} – удельный минимально необходимый суммарный расход энергоресурсов, ГДж/т. При формировании энергетического уравнения (1) принято, что кислород расходуется на обеспечение сжигания природного газа в соотношении 2 к 1 и на окисление углерода в чугуне.

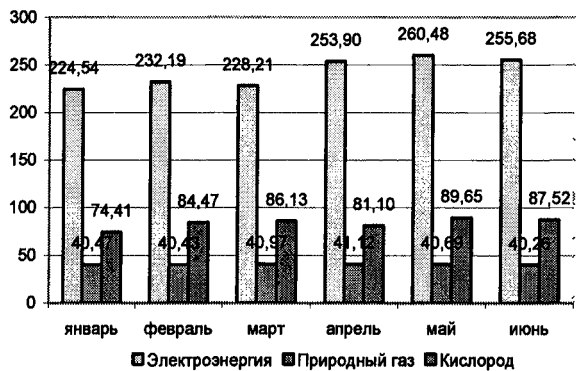


Рис. 11. Стоимость энергоресурсов (единицы энергии) для ДСП в 2007 г., руб./ГДж

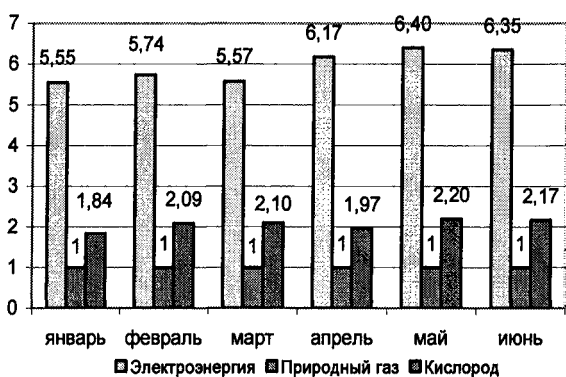


Рис. 12. Соотношение стоимости энергоресурсов (единицы энергии) для ДСП в 2007 г. по отношению к природному газу, относительные единицы

Поскольку целью нашей работы является снижение энергозатрат на обеспечение выплавки стали в ДСП, то вторым уравнением – целевым, безусловно, должно быть уравнение, определяющее удельные энергозатраты на получение тонны стали, руб./т:

$$x_1 \Pi_1 + x_2 \Pi_2 + x_3 \Pi_3 = \mathcal{Z}_{\text{уд}} \geq \min, \quad (2)$$

где Π_1, Π_2, Π_3 – цены в рублях на единицу физической величины энергоресурсов, соответственно, на электроэнергию, природный газ и кислород; $\mathcal{Z}_{\text{уд}}$ – суммарные удельные затраты на выплавку 1 т стали.

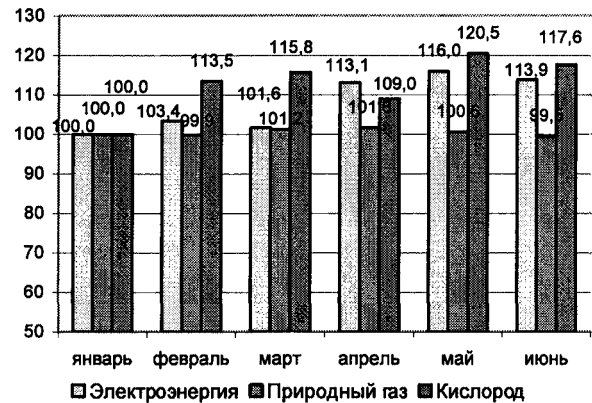


Рис. 13. Соотношение стоимости энергоресурсов (единицы энергии) для ДСП в 2007 г. по отношению к данным января, %

Таким образом, имеется два уравнения с тремя неизвестными. Решение такой задачи вполне возможно методом линейного программирования. Для этого необходимо определить область допустимых решений путём учёта и формулирования ограничений на переменные. Первым очевидным ограничением является условие неотрицательности значений переменных – потребление энергоресурсов не может быть отрицательным:

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0. \quad (3)$$

Другие ограничения определяются пропускной способностью фурм, горелок. Пересчёт паспортных характеристик упомянутых агрегатов от часовой производительности к возможным максимальным удельным расходам на тонну стали природного газа и кислорода приводит к следующим значениям:

$$x_2 \leq 19 \text{ м}^3/\text{т}; \quad (4)$$

$$x_3 \leq 65 \text{ м}^3/\text{т}. \quad (5)$$

Дополнительным ограничением, определяющимся требованиями технологии, является необходимость по меньшей мере двукратного превышения расхода кислорода по отношению к природному газу:

$$2x_2 \leq x_3. \quad (6)$$

В качестве условий, определяющих нижние границы величин параметров, примем близкие к средним фактическим за соответствующий месяц значения параметров. Для февраля 2007 г. минимальные ограничения примут следующие значения:

$$x_2 \geq 5 \text{ м}^3/\text{т}; \quad (7)$$

$$x_3 \geq 52 \text{ м}^3/\text{т}. \quad (8)$$

В данной работе не учитываются возможные ограничения, вытекающие из баланса кислорода, природного газа, определяющиеся пропускной способностью кислородных и газовых магистралей, достаточным количеством жидкого чугуна и, соответственно, достатком углерода для окисления предполагаемым количеством кислорода и другие. Это факторы для дальнейшего исследования. В настоящей работе изучаются основные тенденции влияния некоторых факторов на энергозатраты, энергоёмкость электросталеплавильного производства. В результате, область допустимых решений для задачи (1)–(2), построенная на основе ограничений (3)–(8) с использованием данных февраля 2007 г. и отвечающая условию достаточности суммарных затрат энергоресурсов для выполнения технологических операций расплавления и доводки металла, приведена на рис. 14.

Выразим переменную x_1 через две другие. Выражение (1), после преобразований и подстановки численных значений коэффициентов, принимает вид:

$$x_1 = 510,556 - 2,187x_2 - 3,559x_3. \quad (9)$$

Выражение (2), после подстановки (9), преобразований и подстановки численных значений цен энергоресурсов, принимает вид:

$$Z_{уд} = 426,763 - 0,473x_2 - 2,114x_3 \geq \min. \quad (10)$$

Исследуем полученную область допустимых решений. Из теории математического программирования известно, что наилучшее решение находится на границе области. На рис. 14 исходный режим, характеризующийся фактическими средними за месяц удельными расходами энергоресурсов, обозначен точкой И. Возможные решения определяются из (9) и могут быть представлены семейством параллельных прямых, имеющих наклон влево от оси ординат. Причём графики допустимых решений смещаются вправо по мере снижения величины параметра x_1 (удельного расхода электроэнергии) по отношению к исходной. Значения удельных энергозатрат, соответствующих точкам возможных

решений А – М, определяются из (10). Результаты расчётов приведены в таблице.

Расчёты удельных затрат на производство электростали в феврале 2007 г.

Точка	x_1 , кВт·ч/т	x_2 (ПГ), м ³ /т	x_3 (O ₂), м ³ /т	Затраты, руб./т
И	309,03	5,45	53,3	311,57
А	300	11,63	52	311,27
Б	300	5	56,1	305,79
В	283,89	19	52	307,78
Г	283,89	5	60,6	296,22
Д	280	19	53,1	305,47
Е	280	5	61,7	293,91
Ж	268,24	19	56,4	298,48
З	268,24	5	65	286,92
К	250	19	61,5	287,65
Л	250	13,34	65	282,97
М	237,62	19	65	280,29

Необходимо отметить, что наилучшее решение, которому соответствуют наименьшие удельные энергозатраты, находится в точке М, для которой характерны максимально возможные удельные расходы природного газа и кислорода и наименьшее удельное потребление электроэнергии. Для всех промежуточных решений характерно следующее положение: более выгодно работать с минимальными удельными расходами природного газа до достижения точки З (см. пары точек А – Б, В – Г, Д – Е, Ж – З), а в дальнейшем – на границе максимальных удельных расходов кислорода (см. пару точек К – Л). Иными словами, наиболее целесообразно работать на нижней и правой границах зоны допустимых решений, а именно, с максимально возможным превышением расхода кислорода над расходом природного газа. Аналогичные результаты достигаются и в расчётах для других месяцев, например, марта и апреля, в том числе наилучший результат достигается близкий к февральскому: 279,5 руб./т в марте и 281,25 руб./т в апреле. Следу-

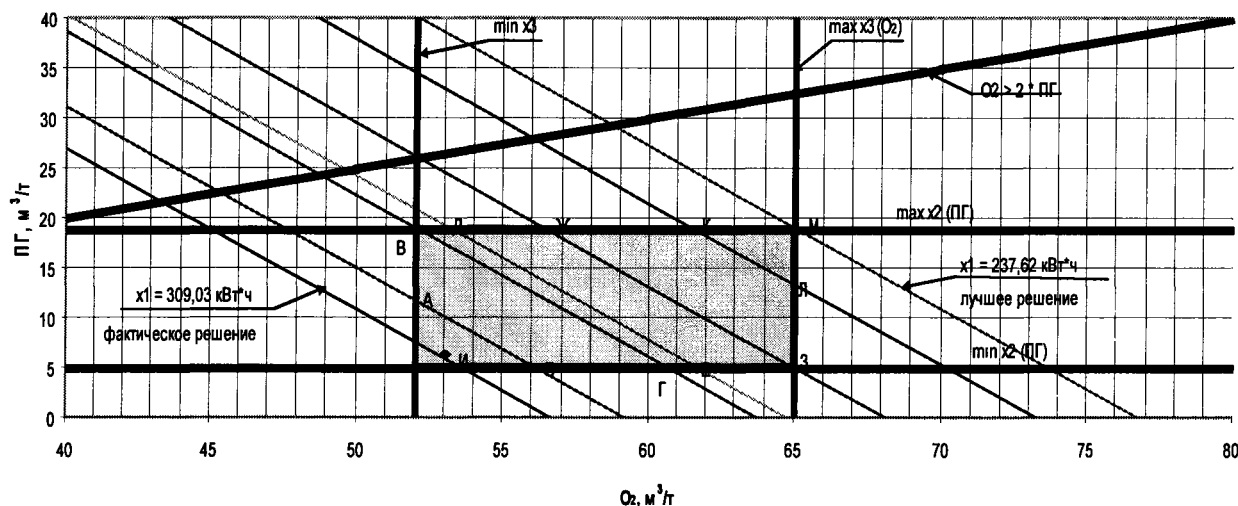


Рис. 14. Область допустимых решений (февраль 2007 г.)

ет отметить, что с помощью рассмотренной оптимизации энергобаланса (пока без учёта упомянутых выше дополнительных факторов) теоретически возможно снижение удельных энергозатрат для обеспечения работы ДСП на 10 %.

Обследование работы ДСП было проведено и на основе статистического анализа производственных и технологических факторов с использованием метода пошаговой линейной корреляции. Базу для исследования составили все параметры, отражаемые количественными характеристиками в паспортах плавов печей и фиксируемые автоматически. Все марки выплавляемой стали для облегчения возможности анализа были сгруппированы в четыре группы по следующим признакам: первая группа – легированные ($Si \geq 1,0\%$ или $Mn \geq 1,0\%$), вторая группа – высокоуглеродистые ($C > 0,30\%$), третья группа – низкосернистые ($S < 0,010\%$), четвёртая группа – рядовые ($C < 0,30\%$). Объём выборки ограничен двумя месяцами: с 1 января по 28 февраля 2007 г. Значения параметров усреднялись в пределах соответствующих суток для каждой из печей отдельно. Таким образом, обследование характеристик работы каждой из печей проводилось отдельно, поскольку срок эксплуатации печей измеряется пока месяцами и значительно различается. Фактор освоенности оборудования нельзя сбрасывать со счетов.

Поскольку электроэнергия составляет наиболее значительную долю в энергобалансе ДСП и по энергосодержанию, и в денежном выражении, то статистический анализ был направлен, главным образом, на выявление факторов, наиболее значимо влияющих на удельный расход электроэнергии. Наиболее значимыми, оказывающими наиболее сильное влияние на удельный расход электроэнергии ДСП-2, являются следующие факторы: количество лома в загрузке печи, масса плавки, количество плавов металла четвёртой группы за сутки. В приведённом перечислении факторы расставлены по степени уменьшения их влияния. Множественная линейная зависимость, полученная на основе указанного статистического анализа, выглядит следующим образом:

$$w_2 = 290,7 + 1,05 \cdot \langle \text{Лом} \rangle - 0,9375 \cdot \langle \text{Плавка} \rangle - 1,05 \cdot \text{Me4}, \quad (11)$$

где w_2 – удельный расход электроэнергии на ДСП-2, кВт·ч/т стали; $\langle \text{Лом} \rangle$ – средняя масса лома в загрузке печи за сутки, т; $\langle \text{Плавка} \rangle$ – средняя масса плавки (слитого металла) за сутки, т; Me4 – среднее количество плавов металла четвёртой группы за сутки, штук. Структура зависимости указывает на то, что увеличение загрузки лома определяет повышение удельного расхода электроэнергии на выплавку стали, увеличение же массы плавки и количества плавов рядовых сталей ведёт к снижению удельного расхода электроэнергии.

Аналогичный статистический анализ для ДСП-1 даёт существенно отличающиеся результаты. При этом первыми двумя наиболее значимыми остаются те же показатели, что и для ДСП-2, и к ним добавляются степень окисленности металла, количество плавов металла третьей группы и температура металла при сливе. Множественная линейная зависимость удельного расхода электроэнергии на ДСП-1 от указанных факторов выглядит следующим образом:

$$w_1 = 132,8 + 1,48 \cdot \langle \text{Лом} \rangle - 0,7419 \cdot \langle \text{Плавка} \rangle + 0,03148 \cdot \langle \text{Окисл} \rangle + 3,993 \cdot \text{Me3} + 0,02001 \cdot \langle \text{Темпер} \rangle, \quad (12)$$

где w_1 – удельный расход электроэнергии на ДСП-1, кВт·ч/т стали; $\langle \text{Лом} \rangle$ – средняя масса лома в загрузке печи за сутки, т; $\langle \text{Плавка} \rangle$ – средняя масса плавки (слитого металла) за сутки, т; $\langle \text{Окисл} \rangle$ – средняя степень окисленности металла за сутки, ppm; Me3 – среднее количество плавов металла третьей группы за сутки, штук; $\langle \text{Темпер} \rangle$ – средняя температура металла при сливе за сутки, °С.

Структура выражений (11) и (12) в основном подтверждает результаты, полученные выше методом линейного программирования: увеличение количества лома в загрузке ДСП, приводящее к повышению удельного расхода электроэнергии, определяет снижение количества жидкого чугуна и тем самым ограничивает применение кислородного дутья. А между тем соотношение цен на энергоресурсы диктует противоположную стратегию – повышение доли кислорода в энергобалансе ДСП, для чего необходимо достаточное количество жидкого чугуна либо добавление углеродистой массы в плавку. Здесь опять пока не учитывается стоимость упомянутых компонент процесса производства стали.

Рассмотренные закономерности позволяют выбирать пути оптимизации энергобаланса ДСП при прогнозируемых изменениях стоимости входящих в него энергоресурсов. Однако, очевидно, что повышение стоимости природного газа повлечёт за собой определённое изменение стоимости электроэнергии, углей, чугуна, лома и других компонентов плавки стали. Всё это указывает на необходимость дальнейших более глубоких обследований с учётом большего числа факторов.

Литература

1. Копцев, Л. А. Сквозной энергетический анализ и подходы к оптимизации энергобаланса в ОАО «ММК» / Л. А. Копцев, Ф. А. Рашкин, Д. В. Поварницын // Промышленная энергетика. – 2002. – № 9. – С. 5–8.
2. Абчук, В. А. Экономико-математические методы: Элементарная математика и логика. Методы исследования операций / В. А. Абчук. – СПб.: Союз, 1999. – 320 с.

Поступила в редакцию 20 мая 2008 г.

ОПЕРАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ГОРЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ

Л.С. Казаринов, Т.А. Игнатова, А.В. Кинаш, О.В. Колесникова, Д.А. Шнайдер

Рассматривается способ автоматической оптимизации процесса горения в топке энергетического котла на основе прогнозного значения КПД котла, позволяющего понизить инерционность автоматической системы регулирования экономичности процесса горения. Приводятся временные характеристики поиска оптимального значения КПД.

Ключевые слова: паровые котлы, энергетические котлы, процесс горения, оптимизация процесса горения, экономичность процесса горения, регулирование процесса горения.

Оптимизация экономичности процессов горения в топке энергетического котла является актуальной задачей, непосредственно связанной с минимизацией расхода топлива. Типовым подходом к решению данной задачи является регулирование соотношения «топливо–воздух» на входе топки котла по содержанию кислорода (O_2) в дымовых газах [1–3]. Однако содержание O_2 не является постоянным в процессе эксплуатации, так как его значение зависит от многих факторов: паровой нагрузки, качественного состава топлива, потерь теплоты с уходящими газами и др.

В этой связи представляется целесообразным осуществлять регулирование экономичности процесса горения по прямым показателям. Однако использование регулирования по прямым показателям экономичности котла обладает повышенной инерционностью. Этот недостаток особенно проявляется для котлов, работающих в условиях переменных характеристиках топлива. Подобные режимы характерны для котлов, в которых сжигаются вторичные энергетические ресурсы технологических производств.

В данной работе предлагается для оптимизации режима горения в топке котла использовать прогнозные значения КПД котла, которое позволяет понизить инерционность автоматической системы регулирования экономичности процесса горения.

Казаринов Лев Сергеевич – д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ, заведующий кафедрой автоматизации и управления ЮУрГУ; kazarinov@ait.susu.ac.ru.

Игнатова Татьяна Александровна – инженер кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; tanya_ignatova@mail.ru.

Кинаш Александр Викторович – ведущий специалист по автоматизации ЦЭС ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»; kinash@mnmk.ru.

Колесникова Ольга Валерьевна – к.т.н., доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; porova_ov@ait.susu.ac.ru.

Шнайдер Дмитрий Александрович – к.т.н., доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; shnyder@ait.susu.ac.ru.

1. Экстремальная автоматическая система регулирования экономичности процессов горения

Функциональная схема экстремальной автоматической системы регулирования экономичности процессов горения изображена на рис. 1. Система состоит из двух контуров. Внутренний контур образуют объект 1 регулирования и автоматический регулятор 2 подачи общего воздуха, действующий по упрощенной схеме пар D_n – воздух G_v . Внешний контур составляет объект 1 регулирования, экстремальное устройство 3 с входным сигналом по прогнозной оценке показателя экономичности процесса горения $\phi^{np}(t)$, а также устройство выработки прогнозной оценки показателя экономичности процесса горения 4 с входным сигналом по тепловой мощности $Q_{вх}(t)$, вносимой в топку котла с топливом, и сигналом $Y_{вых}(t)$, характеризующим значение выходной тепловой мощности, который в варианном исполнении может измеряться:

- на выходе котла;
- на выходе барабана для барабанных котлов;
- как оценка тепловыделения в топке котла;
- как сигнал, пропорциональный тепловосприятлику топочных экранов.

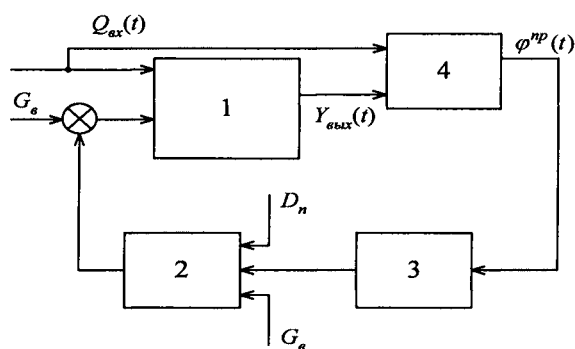


Рис. 1. Функциональная схема экстремальной автоматической системы регулирования

Процесс автоматической оптимизации процесса горения в топке для энергетических котлов осуществляется следующим образом.

Автоматический регулятор 2 подачи воздуха (рис. 1) действует как регулятор соотношения рас-

ход пара D_n – расход воздуха G_b и обеспечивает в первом приближении оптимум этого соотношения в статике в соответствии с режимной картой энергетического котла при постоянном расходе топлива. Далее экстремальное устройство 3, действующее по принципу запоминания и оценки экстремума по приращению, устраняет возможную статическую неточность регулятора 2 при действии на экономичность процесса горения изменяющихся во времени факторов и выводит систему регулирования в область экстремума сигнала по прогнозной оценке показателя экономичности процесса горения $\varphi^{np}(t)$ путем принудительного изменения в заданных пределах расхода воздуха, поступающего в топку энергетического котла.

Схема устройства выработки прогнозной оценки показателя экономичности процесса горения приведена на рис. 2.

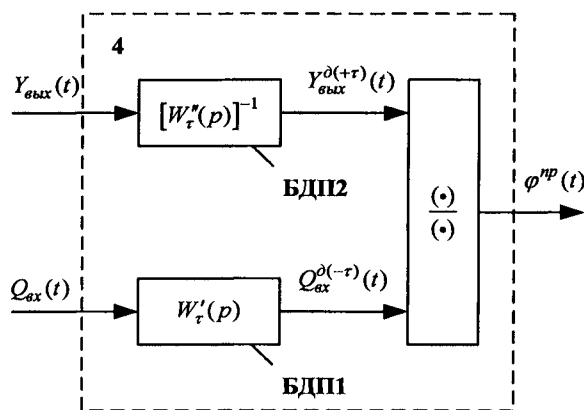


Рис. 2. Схема устройства выработки прогнозной оценки показателя экономичности процесса горения

Здесь БДП1 – блок динамической задержки сигнала $Q_{вх}(t)$ с передаточной функцией $W'_\tau(p)$ (где $p = d/dt$), соответствующей переходной функции $h'(t)$; БДП2 – блок динамического опережения сигнала $Y_{вых}(t)$ с передаточной функцией $[W'_\tau(p)]^{-1}$, соответствующей переходной функции $h''(t)$; $(\bullet)/(\bullet)$ – блок деления; $Q_{вх}^{\delta(-\tau)}(t)$ – входной сигнал $Q_{вх}(t)$ с динамическим запаздыванием на тактовый сдвиг τ ; $Y_{вых}^{\delta(+\tau)}(t)$ – выходной сигнал $Y_{вых}(t)$ с динамическим опережением на тактовый сдвиг τ .

На рис. 3 приведены типовые переходные функции, характеризующие динамические свойства энергетического котла и устройства выработки прогнозной оценки показателя экономичности процесса горения.

На рис. 3 введены следующие обозначения: $h_n(t)$ – нормированная переходная функция котла, определяемая по соотношению

$$h_n(t) = \frac{h(t)}{h(\infty)},$$

где $h(t)$ – переходная функция котла по выходному сигналу $Y_{вых}(t)$ при подаче с топливом на вход кот-

ла импульса тепловой мощности $Q_{вх}(t)$; $h'_n(t)$ – нормированная переходная функция, совпадающая с переходной функцией $h_n(t)$ в интервале $[0; \tau]$ и равная единице при $t > \tau$; $h''_n(t - \tau)$ – нормированная переходная функция, совпадающая с переходной функцией $h_n(t)$ в интервале $[\tau; \infty)$.

Измерение прогнозной оценки показателя экономичности процесса горения в предлагаемом устройстве 4 (рис. 2) отличается от известных способов тем, что используется динамически синхронизированное отклонение сигнала выработки тепла на выходе котла к количеству тепла, внесенного в топку. Существующие подходы к решению данной задачи основаны, например, на использовании среднестатистической оценки показателя экономичности процесса горения:

$$\varphi^{cp} = \frac{Y_{вых}^{cp}}{Q_{вх}^{cp}},$$

где $Q_{вх}^{cp}$ – среднее количество тепловой мощности, вносимой в топку котла с топливом за период наблюдения; $Y_{вых}^{cp}$ – значение сигнала, характеризующего среднее количество выходной тепловой мощности, выработанной за период наблюдения.

Данная оценка является инерционной и не может служить для целей оперативной оптимизации процесса горения в топке энергетического котла.

Использование для указанной цели оценки показателя экономичности процесса горения по текущим значениям сигналов

$$\varphi(t) = \frac{Y_{вых}(t)}{Q_{вх}(t)}$$

некорректно, так как импульс тепловой мощности на входе котла проходит на выход котла с динамическим запаздыванием. Поэтому оба сигнала $Q_{вх}(t)$ и $Y_{вых}(t)$ являются динамически не синхронизированными.

Предлагается корректное измерение показателя экономичности процесса горения, основанное на динамической синхронизации сигналов процессов подачи тепловой мощности с топливом на вход котла и выработки тепловой мощности на выходе котла [4] в соответствии со схемой устройства на рис. 2:

$$\varphi^{np}(t) = \frac{Y_{вых}^{\delta(+\tau)}(t)}{Q_{вх}^{\delta(-\tau)}(t)}.$$

При этом величина тактового сдвига τ выбирается исходя из условий обеспечения требуемой скорости сходимости процесса поиска оптимального соотношения топливо–воздух и заданной точности прогноза.

2. Результаты расчетов

Сравнительные временные характеристики поиска оптимального значения КПД, получаемые в соответствии с предлагаемым способом и способом, изложенным в [3], приведены на рис. 4.

Здесь представлены траектории выхода экстремального регулятора в область максимума показателя экономичности процесса горения: $A_0-A_1-A_2-A_3-A_4$... для способа, изложенного в [3]; $A_0-B_1-B_2-B_3-B_4$... для предлагаемого способа. Шаги поиска экстремального регулятора равны интервалу времени T_1 переходного процесса $h_n(t)$ (см. рис. 3). Шаги поиска предлагаемого экстремального регулятора состоят из такта задержки τ , переходный процесс в котором соответствует переходной функции $h'(t)$, и интервалу времени $T_{пр}$ переходного процесса, соответствующего переходной функции $h_n^{(i)}(t)$ обратного динамического оператора $[W''(p)]^{-1}$. Так как обратный динамический оператор $[W''(p)]^{-1}$ дает прогнозную оценку показателя экономичности процесса горения, суммарный шаг поиска T_2 по заявленному способу будет меньше интервала времени T_1 : $T_2 < T_1$. В итоге быстроедействие системы экстремального регулирования по заявленному способу будет выше. Эксперименты с котлом типа ТП-200-1, показали, что при величине шага $T_1 = 2$ мин величина шага T_2 соответствовала 0,8 мин.

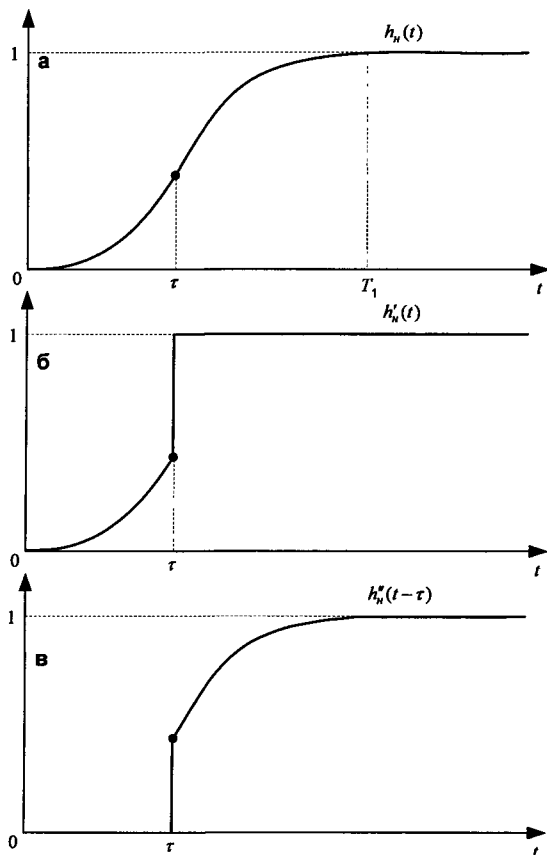


Рис. 3. Типовые переходные функции

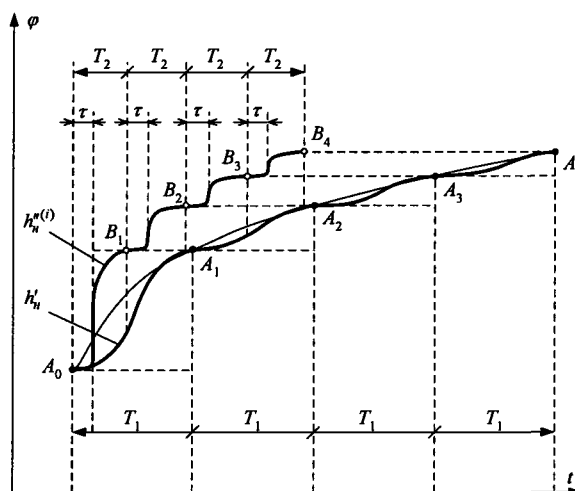


Рис. 4. Сравнительные временные характеристики поиска оптимального значения КПД

Заключение

1. Для повышения эффективности процессов горения в топках энергетических котлов, работающих в резко выраженных динамических режимах, целесообразно использовать системы автоматической оптимизации по прямым показателям экономичности.

2. Использование в качестве критерия оптимизации прямых показателей экономичности, вычисляемых на основе статистических оценок, приводит к повышенной инерционности системы автоматического регулирования. Для решения быстрогодействия системы автоматической оптимизации целесообразно использовать прогнозные оценки показателей.

3. В работе предложена прогнозная оценка показателей экономичности, основанная на динамической синхронизации.

Литература

1. Плетнев, Г. П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций / Г. П. Плетнев. – М.: Энергоиздат, 1981. – 368 с.
2. А. с. 735869 СССР. Способ автоматической оптимизации процесса горения в котле / В. Ю. Вадов, Ю. С. Денисов. – Оpubл. 1980, Бюл. № 19.
3. А. с. 1064078 А СССР. Способ автоматической оптимизации процесса горения в топке барабанного парового котла / Г. П. Плетнев, А. Н. Лесничук, В. С. Мухин – Оpubл. 1983, Бюл. № 48.
4. Казаринов, Л. С. Оперативное управление технологическими процессами с прогнозом показателей энергетической эффективности / Л. С. Казаринов, Д. А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2008. – Вып. 8, № 17(117). – С. 9–12.

Поступила в редакцию 28 апреля 2008 г.

ОПТИМИЗАЦИЯ НАГРУЗКИ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ТУРБОАГРЕГАТОВ ПО ДАННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ НЕПОЛНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Л.С. Казаринов, Т.А. Игнатова, О.В. Колесникова

Рассматриваются проблемы оптимизации нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов по данным эксплуатации при неполных исходных данных и пути ее решения. Приводятся математический алгоритм решения задачи оптимизации нагрузки, программа «ТГ-ПАР» и результаты оптимизации при помощи программы «ТГ-ПАР» нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов ТЭС ОАО «ММК».

Ключевые слова: турбоагрегаты, оптимизация нагрузки турбоагрегатов.

Одно из главных направлений повышения эффективности топливоиспользования на ТЭС – внутростанционная оптимизация режимов паротурбинных установок и, в частности, оптимальное распределение нагрузок между агрегатами. Оптимизация режимов ТЭС весьма эффективна, так как в этом случае достигается экономия топлива практически без дополнительных капитальных вложений и эксплуатационных затрат [1].

Особенностью рассмотренной постановки задачи оптимизации нагрузки станций с общим коллектором является то, что по технологическим условиям технически сложно измерить количество тепла отбираемого от каждой турбины в отдельности. Это происходит потому, что пар из отдельных турбин поступает на общий коллектор, в котором трудно выделить индивидуальный вклад конкретной турбины. Измерению доступно только общее количество тепла по отдельным турбинам. С другой стороны, для рационального распределения нагрузки по турбинам необходимо знание индивидуальных энергетических характеристик каждой турбины. Таким образом, рассматриваемая задача решается при неполных исходных данных.

1. Постановка задачи оптимизации

Для эффективного управления режимами параллельно работающих турбоагрегатов необходимо знать их энергетические характеристики, которые представляют собой зависимости объемов потребления пара от объемов выработки электрической и тепловой энергии, а также режимных факторов.

Казаринов Лев Сергеевич – д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ, заведующий кафедрой автоматики и управления ЮУрГУ; kazarinov@ait.susu.ac.ru.

Игнатова Татьяна Александровна – инженер кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; tanya_ignatova@mail.ru.

Колесникова Ольга Валерьевна – к.т.н., доцент кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; popova_ov@ait.susu.ac.ru.

Постановку задачи оптимизации сформулируем для нормированных величин. Целью задачи оптимизации является минимизация потребления пара

$$\min d_0 = (n-1)D_{cp} / (D_{max} - D_{cp}) + \sum_{i=1}^n d_i^p, \quad (1)$$

где D_{cp} , D_{max} – соответственно средняя и максимальная величина пара, потребляемого турбинами; d_0 – общее расчетное потребление пара блоком турбин; d_i^p – расчетное значение потребления пара i -й турбиной, которое определяется на основе следующего соотношения

$$d_i^p = a_{0i} + a_{1i}w_{эi}^r + a_{2i}d_{тi}^r, \quad (2)$$

где a_{ji} – неизвестные коэффициенты зависимости; $w_{эi}^r$ – текущее значение электрической энергии, вырабатываемое i -й турбиной; $d_{тi}^r$ – текущее значение расхода пара на теплофикацию для i -й турбины.

Для записи (1) использовалось правило суммирования нормированных величин. Если для абсолютных величин $y = \sum_{i=1}^n x_i$, то для нормированных

$\eta = (n-1) \frac{x_{cp}}{x_{max} - x_{cp}} + \sum_{i=1}^n \xi_i$, где η – нормированная величина y ; ξ_i – нормированная величина x_i .

2. Решение задачи оптимизации

Для указанной задачи существуют следующие ограничения.

1. На потребление пара турбиной, исходя из следующих областей границы нормативной паровой характеристики

- первая граница (режим с нулевым теплофикационным отбором)

$$d_0 \geq g_{1i} + h_{1i}w_3; \quad (3)$$

- вторая граница (ограничение на максимальный расход в конденсатор)

$$d_0 \geq g_{2i} + h_{2i}w_3, \quad (4)$$

где g_{1i} , h_{1i} , g_{2i} , h_{2i} – коэффициенты, определяющие границы. С учетом (2) ограничения (3), (4) на потребление пара турбиной выражаются следующими соотношениями:

- первая граница

$$a_{0i} + (a_{1i} - h_{1i})w_{3i}^T + a_{2i}d_{Ti}^T \geq g_{1i};$$

- вторая граница

$$a_{0i} + (a_{1i} - h_{2i})w_{3i}^T + a_{2i}d_{Ti}^T \geq g_{2i}.$$

2. На выработку электрической энергии

$$w_3^P = w_{30},$$

где w_{30} – заданное значение электрической энергии, которое необходимо выработать блоком турбин; w_3^P – общая выработка электрической энергии блоком турбин, которая определяется из следующего соотношения

$$w_3^P = (n-1) \frac{w_3^{cp}}{w_3^{\max} - w_3^{cp}} + \sum_{i=1}^n w_{3i}^T,$$

где $w_{3i}^T \leq w_{3i}^{\max}$, где w_{3i}^{\max} – максимально возможная выработка электроэнергии i -й турбиной, которая определяется по нормативной паровой характеристике.

3. На расход пара теплофикационного отбора

$$d_{Ti}^{\min} \leq d_{Ti}^T \leq d_{Ti}^{\max},$$

где d_{Ti}^{\max} , d_{Ti}^{\min} – соответственно максимально и минимально возможные расходы пара теплофикационного отбора.

4. На тепловую нагрузку

$$q_T^P = q_{T0},$$

где q_{T0} – общая тепловая нагрузка блока турбин, которую необходимо выработать; q_T^P – расчетная тепловая нагрузка блока турбин, которая определяется

из соотношения $q_T^P = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i u_i$, где c_i – неизвестные коэффициенты зависимости; u_i – расчетная величина, определяемая по соотношению

$$u_i = a_{2i}d_{Ti}^T.$$

Данную задачу также можно решать с учетом поправок. В этом случае соотношения (2)–(4) соответственно будут иметь вид

$$d_i^P = a_{0i} + a_{1i}w_{3i}^T + a_{2i}d_{Ti}^T + b_1\Delta p_{0i} + b_2\Delta t_{0i} + b_3\Delta p_{Ti} + b_4\Delta p_{ki};$$

$$a_{0i} + (a_{1i} - h_{1i})w_{3i}^T + a_{2i}d_{Ti}^T + b_1\Delta p_{0i} + b_2\Delta t_{0i} + b_3\Delta p_{Ti} + b_4\Delta p_{ki} \geq g_{1i};$$

$$a_{0i} + (a_{1i} - h_{2i})w_{3i}^T + a_{2i}d_{Ti}^T + b_1\Delta p_{0i} + b_2\Delta t_{0i} + b_3\Delta p_{Ti} + b_4\Delta p_{ki} \geq g_{2i},$$

где Δp_{0i} – нормированная величина отклонения давления свежего пара от его нормативного значения; Δt_{0i} – нормированная величина отклонения температуры свежего пара от его нормативного

значения; Δp_{Ti} – нормированная величина отклонения давления пара в теплофикационном отборе от его нормативного значения; Δp_{ki} – нормированная величина отклонения давления пара в конденсационном отборе от его нормативного значения.

На вводимые поправки существуют следующие ограничения

$$\Delta p_{0i}^{\min} \leq \Delta p_{0i} \leq \Delta p_{0i}^{\max},$$

где Δp_{0i}^{\max} , Δp_{0i}^{\min} – соответственно максимальная и минимальная нормированная величина отклонения давления свежего пара от его нормативного значения;

$$\Delta t_{0i}^{\min} \leq \Delta t_{0i} \leq \Delta t_{0i}^{\max},$$

где Δt_{0i}^{\max} , Δt_{0i}^{\min} – соответственно максимальная и минимальная нормированная величина отклонения температуры свежего пара от его нормативного значения;

$$\Delta p_{Ti}^{\min} \leq \Delta p_{Ti} \leq \Delta p_{Ti}^{\max},$$

где Δp_{Ti}^{\max} , Δp_{Ti}^{\min} – соответственно максимальная и минимальная нормированная величина отклонения давления пара в теплофикационном отборе от его нормативного значения;

$$\Delta p_{ki}^{\min} \leq \Delta p_{ki} \leq \Delta p_{ki}^{\max},$$

где Δp_{ki}^{\max} , Δp_{ki}^{\min} – соответственно максимальная и минимальная нормированная величина отклонения давления пара в конденсационном отборе от его нормативного значения.

На основе приведенных соотношений была разработана программа оптимальной нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов по данным эксплуатации по критерию минимума потребления пара блоком турбин.

3. Программа «ТГ-ПАР»

Моделирование оптимизации нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов по данным эксплуатации турбин осуществляется при помощи разработанной программы «ТГ-ПАР». Эта программа рассчитывает необходимые значения параметров для построения энергетических характеристик по заданным параметрам турбогенератора. При постоянной выработке электрической и тепловой мощности, изменяя давление в отборах и температуру свежего пара, можно рассчитать изменения расхода свежего пара и тепла на турбину. Использование программы упрощает расчет режимов турбины по нормативным энергетическим характеристикам.

Искомые параметры рассчитываются на основе нормативных диаграмм для каждой турбины. Так как турбины находятся в эксплуатации длительное время, реальные параметры турбин отличаются от номинальных. Для этого в программе введены расчеты поправок на условия эксплуатации.

Рассмотрим пример расчета коэффициентов влияния режимных параметров турбины на объе-

мы потребления пара и тепла. В качестве расчетного объекта рассмотрим блок турбогенераторов ТЭЦ ОАО «ММК». На первом шаге расчетов задаем приращение отклонению давления пара на входе турбины, при неизменной электрической и тепловой нагрузке турбин приведенной в табл. 1.

Таблица 1
Значения электрической и тепловой нагрузок турбин

№ ТГ	Электрическая нагрузка $W_э$, МВт	Теплофикационный отбор $D_г$, т/ч
1	52,00	90,09
2	51,00	84,98
3	49,00	119,30
4	60,00	129,62
5	62,00	118,43
6	57,00	131,46

С помощью программы «ТГ-ПАР» рассчитываются значения расхода свежего пара $D_0^{пар}$, т/ч на турбину. Далее рассчитывается потребления тепла на турбину $Q_0^{пар}$, Гкал/ч, по формуле

$$Q_0^{пар} = D_0^{пар} (i_{пар} - i_{пв}),$$

где $i_{пар}$ – энтальпия пара, ккал/кг; $i_{пв}$ – энтальпия питательной воды, ккал/кг.

После этого с помощью программы «Регрессия» надстройки «Пакет анализа» в Excel определяются зависимости

$$Q_0^{пар} = Q_0 + K_{P_0} (P_0 - P_0^{ном}),$$

где K_{P_0} – коэффициент влияния по давлению свежего пара, Гкал/(ч·атм); P_0 – фактическое значение давления свежего пара, атм; $P_0^{ном}$ – номинальное значение давления свежего пара, атм.

В расчетном примере значения K_{P_0} для каждой турбины приведено в табл. 2.

Таблица 2
Значения K_{P_0} для каждой турбины

ТГ1	ТГ2	ТГ3	ТГ4	ТГ5	ТГ6
-0,057	-0,056	-0,054	-0,166	-0,059	-0,054

Аналогично для нахождения коэффициента влияния по температуре свежего пара задаются различные значения отклонения температуры свежего пара от номинального значения. С использованием программы «ТГ-ПАР» определяются $D_0^{пар}$ и $Q_0^{пар}$. После этого с помощью программы «Регрессия» надстройки «Пакет анализа» в Excel определяются зависимости

$$Q_0^{пар} = Q_0 + K_{t_0} (t_0 - t_0^{ном}).$$

где K_{t_0} – коэффициент влияния по температуре свежего пара, Гкал/(ч·°C); t_0 – фактическое значение

температуры свежего пара, °C; $t_0^{ном}$ – номинальное значение температуры свежего пара, °C.

Повторяя указанную процедуру для всех параметров, в результате будет построена расчетная зависимость потребления тепла турбиной

$$Q_0^{пар(расч)} = Q_0^{пар(ном)} + (K_{P_0} \Delta P_0 + K_{t_0} \Delta t_0 + K_{P_T} \Delta P_T + K_{P_k} \Delta P_k).$$

Значения K_{P_0} , K_{t_0} , K_{P_T} , K_{P_k} для каждой турбины приведены в табл. 3.

Таблица 3
Значения коэффициентов влияния для каждой турбины

	K_{P_0}	K_{t_0}	K_{P_T}	K_{P_k}
ТГ1	-0,057	-0,18	3,56	-122,59
ТГ2	-0,056	-0,17	3,32	-121,21
ТГ3	-0,054	-0,16	4,66	-122,18
ТГ4	-0,166	-0,20	15,04	-72,83
ТГ5	-0,059	-0,13	5,44	-76,17
ТГ6	-0,054	-0,12	7,34	-66,23

Фактическую зависимость потребления тепла турбиной по данным эксплуатации представим как

$$Q_0^{пар(ф)} = Q_0^{пар(ф)} + (K_{P_0} \Delta P_0 + K_{t_0} \Delta t_0 + K_{P_T} \Delta P_T + K_{P_k} \Delta P_k),$$

где неизвестная величина $Q_0^{пар(ф)}$ – фактическое потребление тепла в номинальном режиме, Гкал/ч.

$$Q_{0,s}^{пар(ф)} = Q_s^{пар(ф)} + (K_{P_0} \Delta P_{0,s} + K_{t_0} \Delta t_{0,s} + K_{P_T} \Delta P_{T,s} + K_{P_k} \Delta P_{k,s}),$$

где s – номер наблюдения за турбиной. Отсюда следует, что в номинальном режиме фактическое наблюдение тепла определяется формулой

$$\Delta Q_{0,s}^{пар(ф)} = Q_{0,s}^{пар(ф)} - Q_0^{пар(ном)},$$

далее значение отклонения усредняется

$$\Delta Q_0^{пар(ф)} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \Delta Q_{0,s}^{пар(ф)}.$$

В среднем величина $\Delta Q_0^{пар(ф)}$ – прочие резервы, составила 21 тонну, что говорит о значительном отклонении параметров режимов работы турбин ТЭЦ от нормативных значений. В этой связи представляет интерес определить величину отклонений потребления тепла за счет отклонения режимных параметров

$$\delta = K_{P_0} \Delta P_{0,s} + K_{t_0} \Delta t_{0,s} + K_{P_T} \Delta P_{T,s} + K_{P_k} \Delta P_{k,s}.$$

Отклонения представлены в табл. 4.

Таблица 4
Величина отклонения δ потребления тепла за счет отклонения режимных параметров

ТГ1	ТГ2	ТГ3	ТГ4	ТГ5	ТГ6
-6,03	-3,04	-7,00	-4,28	6,02	8,59

Приведенный пример показывает, что с использованием разработанной программы «ТГ-ПАР»,

Расчет потребления свежего пара турбогенераторами, D ₀ т/ч																
№ ТГ	Электрическая нагрузка W _э , МВт	Теплофикационный отбор, Dt, т/ч	Поправка электрической мощности на ΔP ₀ , атм			Поправка электрической мощности на Δt ₀ , °С			Поправка электрической мощности на P _т , атм			Поправка электрической мощности на P ₂ , атм			Тепловая энергия, Q Гкал	Потребление свежего пара D ₀ , т/ч
			Номинальное P ₀	Отклонение ΔP ₀	ΔW _{р0} , МВт	Номинальная t ₀	Отклонение Δt ₀	ΔW _{т0} , МВт	Номинальное P _т	Отклонение ΔP _т	ΔW _{рт} , МВт	Номинальное P ₂	Отклонение ΔP ₂	ΔW _{р2} , МВт		
1	52	83,17	90	0	0,00	500	14	-1,09	2,00	-0,84	-1,27	0,05	0,00	0,00	91,19	290,00
2	51	83,56	90	4	0,04	500	0	0,00	2,00	-0,78	-1,19	0,05	0,01	-0,24		275,00
3	49	126,66	90	-1	0,04	500	4	-0,29	2,00	-0,60	-1,38	0,05	0,02	-1,06	138,37	280,00
4	61	124,84	90	-1	0,07	500	3	-0,28	1,20	-0,15	-1,20	0,04	0,02	-0,58		304,00
5	62	123,54	127	-2	0,07	540	-10	0,57	0,50	1,00	4,45	0,05	0,02	-0,71	135,00	276,00
6	57	122,39	127	-1	0,03	540	-7	0,42	0,50	1,50	7,34	0,05	0,00	0,00		276,00

Пересчет

Данные

Очистить

Рис. 1. Интерфейс программы «ТГ-ПАР»

можно без особых сложностей выполнить расчеты необходимых значений для таблиц отчета по тепловой экономичности турбин электрических станций.

4. Пример работы программы

Программа расчета оптимального использования пара представлена на рис. 1. В этой программе могут использоваться как новые, так и архивные данные турбоагрегатов. При нажатии кнопки «Данные» всплывает окно (рис. 2).

Рис. 2. Окно ввода даты и времени

В это окно вводим дату в формате «01.02.2005» и время, «01:00–02:00», если дата и время совпадают с уже введенными и сохраненными в базе данных то таблице «Расчет потребления свежего пара турбогенераторами, D₀, т/ч» выводятся значения за этот промежуток времени. Если же такие данные не были введены, то нужно записать их вручную (рис. 3).

При этом данные записываются в ту же основную таблицу. Если необходимо исправить значение, это можно сделать в самой таблице и нажать кнопку «Пересчет». Расчетные значения исправит сама программа

Рис. 3. Окно ввода данных

Далее нужно записать ограничения на параметры режимов турбогенераторов, либо оставить значения в таблице такими, какие они были. Нажимаем кнопку «Оптимизация» (рис. 4).

В окно на рис. 5 нужно внести необходимые значения электрической мощности, тепловой энергии отданной на правый берег и на левый, а также значение перетока. После нажатия «Ok» появляется окно приведенное на рис. 6.

Ограничения на параметры режимов турбогенераторов					
№ ТГ	Максимальный теплотехнический отбор $D_{т_max}$, т/ч	Минимальный теплотехнический отбор $D_{т_min}$, т/ч	Максимальная электрическая нагрузка $W_{э_max}$, МВт	Минимальная электрическая нагрузка $W_{э_min}$, МВт	Максимально возможное потребление свежего пара, D_0 , т/ч
1	175,00	0,00	58,00	0,00	270,00
2	175,00	0,00	58,00	0,00	270,00
3	175,00	0,00	58,00	0,00	270,00
4	160,00	0,00	62,00	0,00	300,00
5	165,00	0,00	57,40	0,00	215,00
6	165,00	0,00	57,40	0,00	215,00

Оптимизация

Расчет потребления пара	
До исходное	До оптимальное
1701,00	?

Рис. 4. Интерфейс ограничения на параметры режимов турбогенераторов

Ограничения

Введите электрическую мощность $W_{э}$, МВт, которую нужно выработать турбинам:

Введите ограничение по выработке тепловой энергии на правый берег $Q_{п/б}$, Гкал:

Введите ограничение по выработке тепловой энергии на левый берег $Q_{л/б}$, Гкал:

Введите значение перетока с левого на правый берег Q_{12} , Гкал:

Ok Выход

Рис. 5. Окно ввода ограничений по выработке тепловой и электрической энергии

В выводимой таблице «Решение задачи оптимизации» (рис. 7) выдаются оптимальные параметры турбоагрегата. А в таблице «Расчет потребления пара» показываются исходное и оптимальное суммарные значения потребления свежего пара.

Результаты поиска решения

Решение найдено. Все ограничения и условия оптимальности выполнены.

Тип отчета: Результаты Устойчивость Пределы

Сохранить найденное решение Восстановить исходные значения

Ok Отмена Сохранить сценарий... Справка

Рис. 6. Окно подтверждения нахождения решения

	Заданная	Оптимизированная
$W_{э}$	330,00	335,00
$Q_{п/б}$	225,00	224,10
$Q_{л/б}$	133,00	135,44
Q_{12}		10,00

Решение задачи оптимизации							
ТГ	$W_{э}$	$D_{т}$	P_0	T_0	$P_{т}$	$P_{к}$	D_0
1	58	26,8	90	505	1,10	0,04	246,07
2	58	83,7	93	500	1,21	0,04	270,00
3	58	80,8	89	500	1,40	0,07	263,41
4	62	160,0	88,5	504	1,02	0,04	297,55
5	47,7	165,0	125	530	1,58	0,06	215,00
6	46	134,6	126	534	2,02	0,06	215,00

Расчет потребления пара	
До исходное	До оптимальное
1701,00	?

Рис. 7. Интерфейс решения задачи оптимизации

Заключение

1. Особенность приведенного алгоритма решения задачи оптимизации заключается в том, что на его основе можно решить задачу оптимизации нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов при неполных исходных данных эксплуатации с учетом нормативных энергетических характеристик турбин.

2. Практическое применение разработанной программы оптимизации нагрузки параллельно работающих турбоагрегатов «ТГ-ПАР» показало на конкретном примере, что с ее помощью можно снизить потребление свежего пара до 11 %.

Литература

1. Качан, А. Д. Оптимизация режимов и повышение эффективности работы паротурбинных установок ТЭС / А. Д. Качан. – Минск.: Высшая школа, 1985. – 176 с.
2. Равич, М. Б. Топливо и эффективность его использования / М. Б. Равич. – М.: Наука, 1971. – 358 с.
3. РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. – 1995.
4. Соловьев, Ю. П. Тепловые расчеты промышленных паротурбинных электрических станций / Ю. П. Соловьев. – М.: Государственное энергетическое издание, 1962. – 190 с.

Поступила в редакцию 28 апреля 2008 г.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Д.А. Шнайдер

В статье рассматривается структура, функции и технические особенности автоматизированной системы диспетчерского управления теплоснабжением зданий на основе полевых технологий, приводятся результаты цифрового мониторинга параметров теплоснабжения зданий, полученные на основе использования внедренных автоматизированных систем.

Ключевые слова: теплоснабжение, диспетчерское управление, тепловые сети, полевые технологии.

В настоящее время базовым подходом для регулирования теплоснабжения на стороне потребителей является внедрение автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов (АИТП) зданий. На основе внедрения АИТП решаются следующие задачи:

1. Вводится качественно-количественное регулирование потребления тепла, благодаря которому потребитель получает возможность отбирать то количество тепла, которое ему необходимо. При отсутствии же регулирования продавец тепла фактически диктует потребителю, какое количество тепла тот должен у него купить. Для рыночной экономики такая ситуация является неприемлемой. Кроме того, многие тепловые сети гидравлически разрегулированы, работают с пониженными температурными графиками. Внедрение АИТП позволяет адаптировать потребителей к этим условиям.

2. На основе использования АИТП можно оптимизировать режимы теплопотребления. Оптимизация состоит в том, что при заданном уровне комфортности потребителей можно значительно сократить потребление тепла за счет рационального регулирования тепловой нагрузки. Составляющими тепловой нагрузки для административно-бытовых и жилых зданий являются отопление, горячее водоснабжение (ГВС) и вентиляция, а для производственных – дополнительно технологическая нагрузка. Для подавляющего большинства потребителей в настоящее время не осуществляется связанного регулирования нагрузок, состоящего в рациональном перераспределении тепла.

Сказанное можно наглядно продемонстрировать на примере потребителей, имеющих нагрузку ГВС. В существующих схемах включения подогревателей ГВС без автоматического регулирования при снижении температуры наружного воздуха увеличивается подача тепла на отопление и одновременно на систему ГВС. В итоге, когда на улице мороз и наблюдается дефицит тепла на отопление из кранов ГВС идет

«кипяток», т.е. происходит нерациональное расходование тепловой энергии. Другим фактором, особенно существенным для параллельного включения нагрузки ГВС, является повышение температуры обратного теплоносителя, что говорит о низкой эффективности работы систем теплопотребления. Проведенные обследования реальных промышленных объектов показали, что в ряде случаев температурный перепад между подаваемым и обратным теплоносителем до установки автоматики составлял менее 5 °С. Введение автоматического регулирования и автоматизированного диспетчерского управления теплоснабжением зданий позволило решить указанные проблемы и получить ощутимую экономию как на жилых, так и промышленных объектах.

1. Структура и функции АСДУ

Укрупненная структурная схема автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ) инженерными системами зданий, приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структура АСДУ теплоснабжением зданий

Шнайдер Дмитрий Александрович – к.т.н., доцент кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; shneider@ait.susu.ac.ru.

АСДУ включает в себя на верхнем уровне рабочую станцию диспетчера, на нижнем уровне – тепловые пункты зданий, оснащенные системами сбора информации и автоматического регулирования процессов теплоснабжения.

Основными задачами внедрения АСДУ являются:

- снижение объемов потребления тепла за счет устранения нерационального его использования, особенно в ночные часы системами ГВС, и в осенне-весенний период системами отопления жилых зданий;

- обеспечения требуемых параметров теплоснабжения жилых зданий, повышения качества теплоснабжения и уровня комфортности у потребителей, в том числе при низких температурах наружного воздуха в зимний период.

АСДУ выполняет следующие функции:

- пофасадное качественно-количественное регулирование отопления зданий в зависимости от температуры наружного воздуха;

- двухрежимное регулирование горячего водоснабжения зданий, предусматривающее снижение температуры горячей воды в ночные часы и ее повышение в часы максимального водоразбора;

- задание режимов работы систем отопления и ГВС с операторской станции диспетчера;

- отображение на операторской станции текущих значений температур, расходов и давлений теплоносителя на тепловых вводах зданий, значений текущего и суммарного теплопотребления;

- контроль доступа в помещения тепловых пунктов;

- контроль и автоматическое отключение силового оборудования в случае затопления тепловых пунктов;

- ведение истории процесса, протоколирование событий;

- просмотр и печать отчетов, просмотр трендов.

2. Технические особенности АСДУ

Далее отметим отличительные особенности технической реализации АСДУ, на основе сети полевого уровня MicroLAN.

Сеть MicroLAN является разработкой фирмы Dallas Semiconductor (США), выпускающей широкий ряд оконечных устройств (микросхем), предназначенных для подключения к данной сети, среди которых есть цифровые датчики температуры, электронные ключи управления, устройства аналогового ввода (АЦП) и вывода (ЦАП), позволяющие организовать сбор данных и передачу сигналов управления между технологическим объектом и системой управления. При этом указанные оконечные устройства обладают низкой стоимостью (так, например, рыночная стоимость датчика температуры составляет \$3).

Сеть MicroLAN обладает следующими основными характеристиками:

- основывается на использовании распространенного двухпроводного либо четырехпроводного телефонного кабеля или витой пары. Питание оконечных устройств и передача данных могут быть организованы по одним и тем же проводникам шины (двухпроводный кабель) или по отдельным проводам (четырёхпроводный кабель);

- сеть может строиться по шинной или древовидной структуре, что позволяет подключить к ней практически неограниченное число устройств. Адресное пространство составляет 2^{56} устройств. При производстве гарантируется уникальность сетевого адреса для каждого прибора, что избавляет от необходимости назначения адресов в процессе монтажа и наладки. На практике максимальное количество датчиков в сегменте сети определяется главным образом длиной линии связи, нагрузочной способностью драйвера и может составлять 300 шт. и более;

- протяжённость сегмента сети без повторителей может достигать 300 метров;

- скорость обмена 16,3 кбит/с, скорость поиска новых устройств 72 устройства в секунду;

- в процессе функционирования сети MicroLAN в любой момент времени к ней может быть подключено новое устройство. При этом ведущий (контроллер) может динамически его обнаружить и включить в обмен.

Преимущества подобной системы видны из таких ее характеристик: например, на ее основе можно охватить контролем все помещения жилого дома, при этом сбор информации осуществляется с помощью однопроводной сети, к которой подключены сотни датчиков температуры с цифровым измерением и централизованной обработкой данных. Таким же образом можно организовать измерение и передачу других сигналов, например, сигналов управления, сигналов пожарной и охранной сигнализации.

Для построения АСДУ используется микропроцессорный контроллер МКТ-22, представленный на рис. 1. Данный контроллер специально разработан для управления тепловыми процессами в жилых и промышленных зданиях с использованием современных технологий полевого уровня. Один контроллер может использоваться для автоматизации 5 тепловых пунктов с регулированием отопления, ГВС и вентиляции. В контроллере реализованы оригинальные алгоритмы, позволяющих реализовывать связанное регулирование тепловых нагрузок и тем самым производить адаптацию потребителей к низкотемпературным режимам теплоснабжения. Контроллер сертифицирован и выпускается серийно ООО НПП «Политех-Автоматика», г. Челябинск.

На базе контроллеров МКТ-22 разработана автоматизированная система диспетчерского управления параметров тепло-, водо- и электро-

снабжения зданий (АСДУ). АСДУ включает в себя на верхнем уровне сервер базы данных на основе СУБД Oracle и автоматизированные рабочие места (АРМ) диспетчеров, на нижнем уровне – узлы передачи данных и управления инженерными системами зданий.

АСДУ выполняет следующие основные функции:

- автоматическое регулирование отопления, водоснабжения и вентиляции жилых, административных и промышленных зданий;
- автоматическое управление уличным и подъездным электроосвещением;
- задание режимов (графиков) работы систем автоматического регулирования с АРМ диспетчеров;
- отображение на АРМ диспетчеров текущих значений параметров контролируемых технологических процессов;
- контроль доступа в тепловые пункты, электрощитовые и др. помещения зданий;

- просмотр и печать отчетов, просмотр трендов.

Для организации автоматизированных систем сбора и передачи АСДУ поддерживает протоколы обмена данными с теплосчетчиками «Взлет ТСР», «ТЭКОН-10/17», «ВКТ-4М», «Теплокон», «Multi-Data», водосчетчиками «US-800», электросчетчиками «ЦЭ6822», а также обеспечивает обмен с базами данных на основе СУБД InterBase и Oracle.

Пример окна программы диспетчера систем тепло- и водоснабжения жилого микрорайона приведен на рис. 2.

3. Цифровой мониторинг теплоснабжения жилых домов на базе АСДУ

Как уже отмечалось, характерной особенностью эксплуатации многих сетей централизованного теплоснабжения, в том числе в г. Челябинске, в настоящее время является то, что вместо проектного графика теплоснабжения фактически используется низкотемпературный график, позволяющий

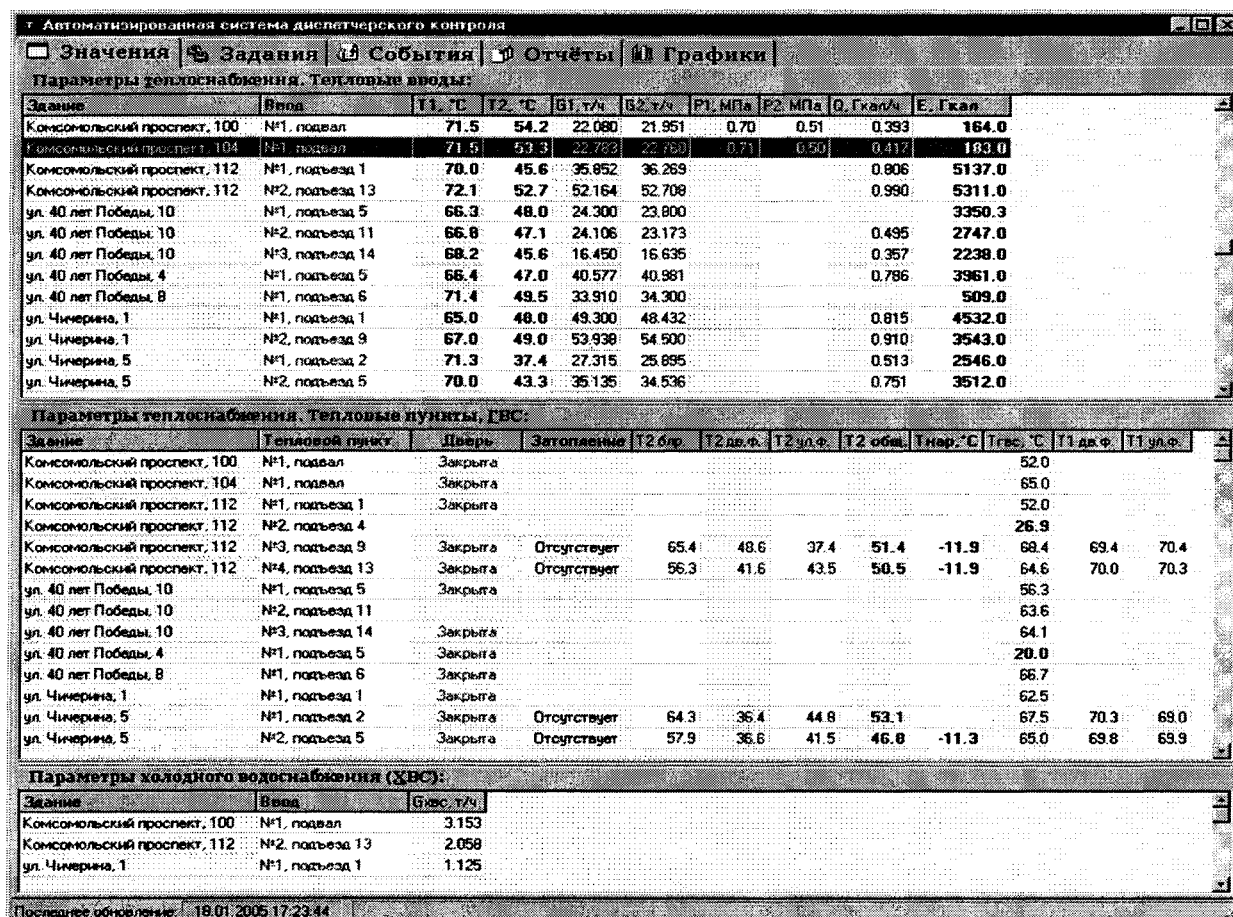


Рис. 2. Пример окна программы диспетчера систем тепло- и водоснабжения жилого микрорайона

- контроль и автоматическое отключение силового оборудования в случае затопления тепловых пунктов;
- ведение истории процесса, протоколирование событий;

повысить выработку электроэнергии на ТЭЦ и снизить потребление топлива. Негативным фактором введения низкотемпературного графика на стороне потребителей является нехватка тепла на отопление зданий при низких температурах наружного воздуха. Отсюда актуальной является

задача выявления резервов тепла и нормализации теплоснабжения потребителей при низкотемпературных режимах.

В этой связи стоит обратить внимание, что низкотемпературное теплоснабжение используется как базовый подход к энергосбережению в передовых странах Запада и, в частности, в Дании. При этом датские исследования показали, что и для стран Восточной Европы существует заложенный при проектировании запас по площади отопительных приборов, достаточный для нормальной работы при пониженных температурах подаваемого теплоносителя.

В целях практического изучения возможностей адаптации потребителей к низкотемпературному теплоснабжению на базе АСДУ был проведен цифровой мониторинг теплоснабжения жилых домов Курчатовского района г. Челябинска при крайне низких температурах наружного воздуха (до -40°C) в январе 2006 г.

На рис. 3–6 приведены графики изменения фактического потребления тепла домами, график изменения температуры воды в системе ГВС, а также графики изменения расходов и температур сетевой воды на вводах соответствующих тепловых пунктов и график изменения температуры наружного воздуха за рассматриваемый период.



Рис. 3. Тепловая нагрузка зданий, Гкал/ч

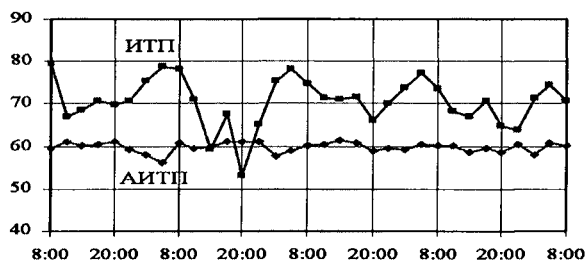


Рис. 4. Температура ГВС, $^{\circ}\text{C}$

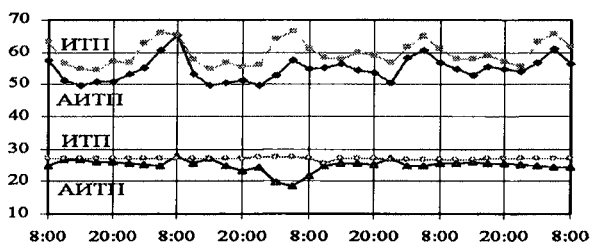


Рис. 5. Параметры обратной воды: температура, $^{\circ}\text{C}$ (верхние графики), расход, т/ч (нижние графики)

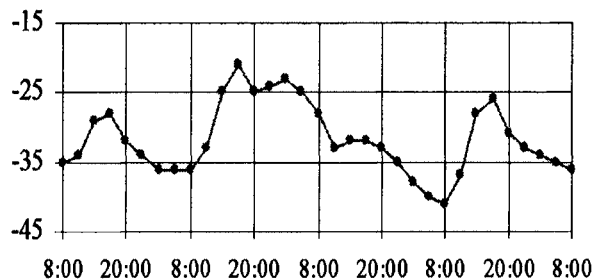


Рис. 6. Температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$

Анализ графиков показывает, что при низких температурах наружного воздуха $T_{\text{нар}}$ подача тепла Q на дом, оборудованный системой автоматического регулирования, выше, чем дома без автоматики.

В то же время, автоматизированный дом имеет более низкий расход теплоносителя из сети G_1 и более низкую температуру обратной воды T_2 , возвращаемой в теплотель.

При этом система автоматического регулирования обеспечивает поддержание температуры горячей воды $T_{\text{гвс}}$ вблизи заданного нормативного значения (60°C), в то время как температура горячей воды в здании без автоматики значительно превышает нормативные значения.

С другой стороны опыт эксплуатации системы АСДУ при более высоких температурах, особенно в весенне-осенний период, показал, что экономия тепла и воды при ее использовании составляет до 20 % и более в зависимости от погодных условий.

Заключение

АСДУ теплоснабжением на основе сети полевого уровня MicroLAN позволяет организовать многообразные функции контроля и регулирования параметров теплопотребления в сетевом районе при минимальных затратах.

В комплексе представленное аппаратное и программное обеспечение позволяет успешно решать задачи мониторинга и регулирования сложных тепловых систем с целью повышения их энергетической эффективности.

Литература

1. Шнайдер, Д. А. Автоматизированная система мониторинга и управления технологическими процессами на основе сети MicroLAN / Д. А. Шнайдер, М. В. Шишкин // Новые программные средства для предприятий Урала, выпуск 1: Сборник трудов Региональной научно-технической конференции / ред. В. Д. Тутарова. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2002. – С. 84–89.

Поступила в редакцию 2 апреля 2008 г.

ГИБКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ТЕХНОЛОГИЯХ «УМНЫЙ ДОМ»

Ю.Т. Карманов, В.С. Спицын, М.М. Григорьев, В.В. Спицын

Рассмотрен беспроводный вариант реализации системы сбора информации о расходовании ресурсов потребителями жилых домов. Предложен эффективный способ организации радиосети высокой плотности, состоящей из автономных радиодатчиков расхода ресурсов на основе стандартной технологии беспроводных сенсорных сетей.

Ключевые слова: беспроводная передача данных, умный дом.

«Интеллектуальное здание»: комплекс систем, интегрированных в единое информационное пространство для максимальной эффективности функционирования служб здания при одновременном снижении эксплуатационных расходов. С технической стороны это: наличие механизма интеграции; гибкость и программируемость; адаптивность; эргономичность и дружелюбность интерфейсов.

В настоящее время, высокие энергозатраты в жилищно-коммунальном хозяйстве (ЖКХ) требуют огромных энергетических мощностей. Отрасль ЖКХ в России потребляет около 20 % всех энергоресурсов страны. При этом энергоэффективность услуг ЖКХ России на одного жителя в 4–5 раз ниже, чем в странах с похожим климатом.

Использование дешевых индивидуальных систем учета, а также регулирование энергоресурсов на основе теплоэнергетического мониторинга систем электро-тепло-водоснабжения каждого отдельного потребителя и всего здания, позволит значительно снизить требуемые энергетические мощности.

Поэтому, данное направление вошло в инновационную образовательную программу ЮУрГУ «Энерго- и ресурсосберегающие технологии», реализуемую в рамках приоритетного национального проекта «Образование».

В настоящее время очень важным является контроль над оплатой за услуги ЖКХ как квартиросъемщиками, так и работниками этих служб. Для этого необходима чтобы система сбора информации о расходовании ресурсов была удобна как для использования работниками ЖЭКа, так и для обычных жильцов.

Карманов Юрий Трофимович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой цифровых радиотехнических систем ЮУрГУ; ea@drts.susu.as.ru.

Спицын Владимир Семенович – доцент кафедры цифровых радиотехнических систем ЮУрГУ; svd@drts.susu.ac.ru.

Григорьев Максим Михайлович – ассистент кафедры цифровых радиотехнических систем ЮУрГУ.

Спицын Василий Владимирович – аспирант кафедры цифровых радиотехнических систем ЮУрГУ; svd@drts.susu.ac.ru.

Возможная структура такой системы может иметь вид, представленный на рис. 1.

Информация поступает с датчиков на радиомодем, кодируется и передается на радиоприемное устройство. Информация с радиоприемного устройства поступает в биллинговую систему, с неё на прибор коммерческого учета энергоресурсов. Таким образом, информация о потреблении энергоресурсов каждого квартиросъемщика становится доступной и наглядной.

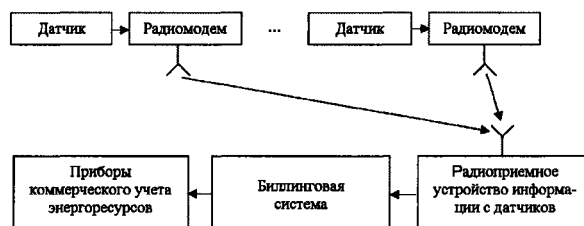


Рис. 1. Структурная схема передачи информации с датчика

Сбор информации с датчиков может быть построен на различных принципах (передача через кабель, радиосигналом и др.)

Рассмотрим передачу информации с использованием технологии беспроводных сенсорных сетей (БСС).

Радиомодем в предлагаемой БСС используется для формирования и передачи в эфир радиочастотных посылок содержащих, пакеты данных от датчиков в различных системах управления и наблюдения, входящих в технологию «Умный дом».

Информационный обмен между модемом и датчиками, с точки зрения рационального подхода, должен осуществляться на основе одного из стандартных интерфейсов. Передаваемое информационное сообщение подвергается помехоустойчивому кодированию и на основе модуляции формируется радиочастотная посылка. Уровень выходного радиосигнала должен быть достаточным для уверенного приема на расстоянии не менее 50 м приемным устройством с чувствительностью 1 мкВ.

Первый вариант – построение системы на основе стандарта ZigBee [1]. Достоинства данного подхода – относительная простота и малые сроки получения работоспособного решения. Недостаток

– необходимость в затрате времени и ресурсов на реализацию этой технологии в выбранном решении для построения эффективных ZigBee-сетей в реальных условиях эксплуатации.

Другим вариантом является применение аппаратно-программной платформы MeshLogic [1], широко используемой для реализации беспроводных сенсорных сетей в различных областях применения. Платформа не является готовым продуктом (изделием), который предоставляется конечному потребителю, так как предполагается ее использование в качестве базы для создания различных беспроводных систем под конкретные требования заказчика и с учетом специфики прикладной задачи. Кроме того, платформа может использоваться как инструмент для проведения исследований по разработке новых алгоритмов и протоколов в области БСС.

Естественно, возникает резонный вопрос об отличиях платформы MeshLogic от других существующих решений, поэтому ниже приведен краткий сравнительный анализ платформы MeshLogic со стандартом ZigBee. ZigBee и MeshLogic функционируют в общедоступном нелицензируемом диапазоне частот 2,4–2,4835 ГГц, при этом в ZigBee скорость передачи данных выше, но физический уровень платформы MeshLogic обладает большей устойчивостью к помехам. Кроме того, для типовых приложений БСС скорость передачи данных не является критичным параметром, в то время как потери пакетов оказывают непосредственное влияние на качество обслуживания сети и энергопотребление узлов.

Краткий сравнительный анализ платформы MeshLogic с решениями на базе ZigBee показал, что MeshLogic имеет ряд преимуществ, что делает ее использование более целесообразным в приложениях, в которых:

- топология сети заранее неизвестна или может изменяться в процессе функционирования;
- направления потоков данных в сети произвольные, возможно изменение источников и потребителей информации;
- требования к аппаратным ресурсам всех узлов должны быть одинаковыми и ниже, чем для полнофункциональных ZigBee-устройств;
- все устройства сети должны работать на автономном источнике питания;
- в процессе работы возможно появление внутрисполосных помех на различных участках сети.

Для предлагаемого решения выберем способ построения узлов (датчиков), только как передатчиков, это позволит снизить стоимость датчика и уменьшить его энергопотребление. Далее рассмотрим сигнал передаваемый датчиками. Выберем объем посылки информация с датчика 64 Б (см. таблицу).

Информационное слово с датчика

Заголовок	Адрес	Данные	КС	Конец
1 Б	3 Б	64 Б	1 Б	1 Б

Информационное слово занимает 70 байт, длина посылки 70 байт×8 бит×64 позиции Голда = 35840. Частоту передачи возьмем 1 МГц, тогда период передачи будет 10 мс. В итоге длина посылки будет 36 мс.

Для исследования помехоустойчивости выбранного подхода было проведено моделирование.

Модель передачи информации в системе БСС представлена на рис. 2. Информация поступает с датчика, кодируется, модулируется и передается на приемник.

Исследования на модели показали высокую степень помехоустойчивости системы. Относительное количество битовых ошибок (BER) не превышает 10^{-4} , при соотношении сигнал–шум не более 3 дБ.

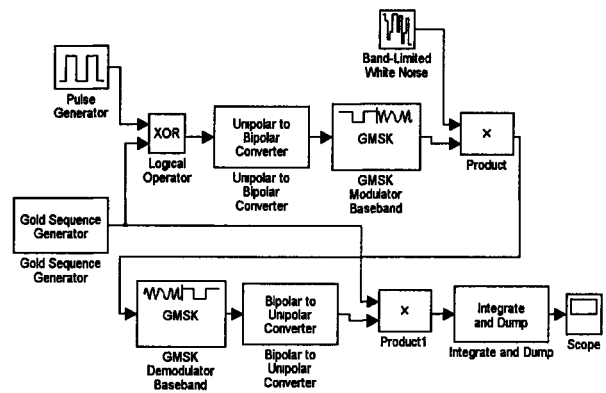


Рис. 2. Модель передатчика и приемника, разработанная в среде MATLAB

Информационный бит с датчика кодируется кодом Голда длиной 64. Псевдослучайные последовательности Голда обеспечивают малый уровень выбросов ВКФ. Коды Голда с периодом $2n - 1$ формируются на основе двух m -последовательностей с отбором так называемых «предпочтительных пар» (preferred pairs), имеющих трехзначную функцию автокорреляции $(-1, -\varphi(t), \varphi(t) - 2)$. Коды Голда формируются путем посимвольного сложения по модулю 2 двух m -последовательностей. Далее биполярный сигнал модулируется гауссовской двухпозиционной частотной манипуляцией с минимальным сдвигом (GMSK).

GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) – это гауссовская двухпозиционная частотная манипуляция с минимальным сдвигом, обладающая двумя особенностями, одна из которых – «минимальный сдвиг», другая – гауссовская фильтрация. Обе особенности направлены на сужение полосы частот, занимаемой GMSK-сигналом.

Для построения системы необходим микроконтроллер небольшого размера и с маленьким потреблением энергии. Этим условиям удовлетворяет микроконтроллер MSP43015х/16х.

Такая частота этого микроконтроллера может быть установлена в широких пределах, что позволяет оптимизировать потребление устройства под целевую задачу. Микроконтроллер снабжен

подсистемой аналогового ввода/вывода. АЦП имеет устройство выборки – хранения, позволяющее считывать одновременно до 8 аналоговых сигналов. Период выборок 10 мкс позволяет использовать данный микроконтроллер со всеми основными типами промышленных датчиков: виброакустическими, тензо, термо, давления, положения, Холла и прочих.

Технические параметры:

- напряжение питания 1,8–3,6 В;
- потребляемый ток: активный режим (1 МГц, 2,2 В) 280 мкА; режим ожидания 1,6 мкА; только память – 0,1 мкА;
- архитектура 16-битная, RISC, 125 нс/операция. Тактовая частота 32 кГц...8 МГц

В радиомодеме предлагаем использовать антенну Ф-типа, впаянную в поверхность платы. Антенна разработана Zhi Ning Chen (Сингапур) [2].

На рис. 3 показаны размеры антенны, толщина $h = 1,66$ мм, длина $L = 15$ мм, ширина $W = 4,9$ мм, два идентичных рукава с размерами $a = 9,6$ мм и $b = 0,3$ м. Отступ от края прямоугольника составляет $s = 0,3$ мм с каждой стороны, точка подключения питания находится на расстоянии $d = 1,9$ мм от угла прямоугольника.

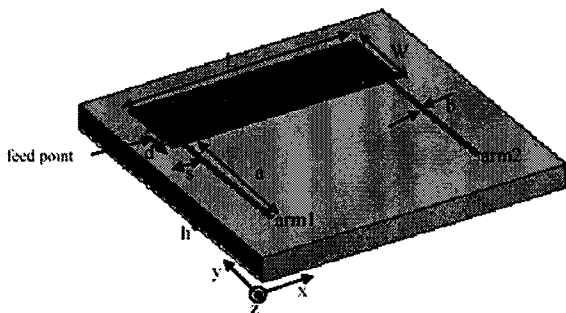


Рис. 3. Геометрия и размеры антенны

Как видно из рис. 4, резонанс антенны приходится на 2,47 ГГц, что удовлетворяет работе в заданном диапазоне частот.

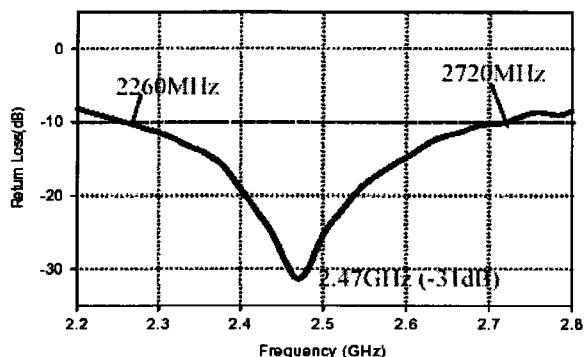


Рис. 4 Частотная характеристика антенны

Для оценки максимального радиуса зоны уверенного приема воспользуемся моделью распространения радиоволн в свободном пространстве с учетом дополнительных затуханий радиосигнала при распространении в зданиях и сооружениях.

Топология рассматриваемой радиосети представляет из себя равномерно распределенную конфигурацию источников радиосигналов – радиодатчиков, и фиксированную точку расположения приемной антенны. Точка расположения антенны может находиться внутри геометрической области расположения радиодатчиков либо быть вынесена за данную область. В первом случае антенна приемника будет ненаправленной, во втором случае может быть направленной. Применение направленных антенн может быть оправдано соображением пространственной селекции необходимых обслуживаемых зон радиодатчиков. Поэтому в качестве рабочей модели выберем случай, когда приемная антенна находится вне зоны обслуживаемых датчиков. Для покрытия нескольких соприкасающихся зон применяются несколько приемных антенн и приемных устройств.

Значение излучаемой мощности телеметрического датчика должно удовлетворять двум противоречащим требованиям: обеспечить минимальное энергопотребление и обеспечение максимальной дальности связи. Поэтому значение выходной мощности необходимо выбирать из критерия наибольшей эффективности использования энергии источника питания, т.е. при наибольшем КПД. Поскольку передатчик выполнен по принципу нелинейного резонансного усиления, то КПД такого звена достигает 70 % при значении уровня выходной мощности 1–5 мВт.

Для расчетов дальности применим среднее из диапазон значение выходной мощности передатчика – $P_{\text{вых}} = 2,5$ мВт.

В диапазоне рабочих сигналов 2,4 ГГц, при ширине полосы сигнала до 1 МГц, типовая чувствительность приемных устройств составляет 10^{-9} Вт.

Значение максимального радиуса уверенного приема сигнала рассчитаем по формуле [3, 4]:

$$R_{\text{max}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{L \frac{P_{\text{вых}} D_{\text{прм}}}{P_{\text{мин}}}}, \quad (1)$$

где λ – длина волны, L – поправочный коэффициент, $D_{\text{прм}}$ – коэффициент направленного действия приемной антенны, $P_{\text{мин}}$ – чувствительность приемного устройства.

Поправочный коэффициент учитывает значение затухания радиосигналов при распространении в условиях здания, а также эффект усиления сигнала на выходе звена корреляционной обработки приемного устройства.

$$L = L_{\text{пот}} + L_{\text{КФ}}, \quad \text{дБ}, \quad (2)$$

где $L_{\text{пот}}$ – величина затухания при распространении внутри здания, $L_{\text{КФ}}$ – усиление сигнала на выходе фильтра-коррелятора на выходе приемного устройства.

Значение затухания радиосигнала при распространении в здании, при преодолении от 2 до 4 глухих стен или препятствий составляет величину от 15–25 дБ, т.е. выберем $L_{\text{КФ}} = -25$ дБ.

Увеличение радиосигнала на выходе сжимающего фильтра для псевдослучайных последовательностей составляет $L_{\text{КФ}} = \sqrt{N}$, где N – длина кодовой последовательности. Согласно примененному принципу формирования и обработки сигнала на основе кодов Голда с длительностью 64, $L_{\text{КФ}} = 8$ дБ или $L_{\text{КФ}} = 9$ дБ.

С учетом данных значений, поправочный коэффициент, для наиболее удаленного от приемной антенны датчика, составит $L = -14$ дБ.

В качестве приемной антенны применим типовую антенну диапазона 2,4 ГГц, обладающую коэффициентом направленного действия 13–15 дБ. Выберем $D_{\text{прм}} = 13$ дБ.

С учетом полученных значений и формулы (1), рассчитаем максимальный радиус зоны уверенного приема $R_{\text{max}} = 59$ м.

При заданных параметрах, уверенный прием сигналов радиодатчиков будет наблюдаться на расстоянии не более 59 м от точки расположения антенны.

В качестве элемента питания выберем гальванический элемент типа АА в количестве две штуки. Типовое значение напряжение на выходе одного гальванического элемента составляет 1,5 В, импульсный ток разряда до 70 мА, электрическая емкость одного элемента 1200 мАч.

Питание электрических цепей осуществляется от вторичного импульсного источника напряжения, с коэффициентом полезного действия не менее 87 %.

Согласно определению, напряжению на выходе гальванического элемента нагруженный 10 % значением тока от номинальной емкости, в течение 10 ч не выйдет за пределы номинальных значений. Согласно данному определению и закону Джоуля–Ленца, электрическая энергия запасенная в элементе будет составлять не менее 18 Дж.

Рассчитаем энергию электрического потребления электронной схемы телеметрического радиодатчика в режиме передачи данных [5]. Основная мощность потребления в данном режиме будет отбираться выходным передающим усилительным каскадом. Согласно введенным значениям и коэффициенту полезного действия выходного каскада и вторичного источника питания, мощность потребления в данном режиме составит 4,1 мВт. Длительность цикла работы в данном режиме, соглас-

но описанию, не превышает 36 мс. Энергия отбираемая от гальванического элемента, за один цикл передачи информации составит 147,6 мкДж.

Соответственно от двух гальванических элементов, в рабочем диапазоне напряжений, до полного разряда возможно осуществить до 240 тыс. циклов передачи данных. С учетом того, что средний расход энергии гальванического элемента образован преимущественно расходом энергии за счет работы передатчика, расход энергии в режиме ожидания будет несущественным.

При интенсивности 35 тыс. циклов передачи в год (1 раз в 15 мин), с учетом необходимой избыточности, длительность использования одного комплекта гальванических элементов будет не менее 1–2 лет.

Заключение

Для решения задачи индивидуального учета расходуемых энергетических ресурсов в системах ЖКХ, описан беспроводный вариант реализации системы сбора телеметрической информации, основанный на использовании стандартных подходов, характерных для БСС. В качестве достоинств, предлагаемой системы можно указать:

- автоматизированный учет используемых ресурсов;
- низкая закупочная стоимость отдельного телеметрического датчика и низкие эксплуатационные расходы потребителя;
- размер одной зоны обслуживания радиосети соизмерим с размерами типовых жилых зданий;
- высокий потенциальный предел плотности радиосети датчиков;
- автоматизированная система контроля целостности сети.

Литература

1. *Электроника: НТБ.* – 2007. – 128 с.
2. *Chen, Z. N. Broadband Planar Antennas: Design and Applications / Z. N. Chen.* – ABI, 2005.
3. *Радиопередающие устройства / В. В. Шахгильдян и др.* – М.: Радио и связь, 1990. – 432 с.
4. *Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская.* – М.: Наука, 1989. – 544 с.
5. *Найвельта, Г. С. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры / Г. С. Найвельта.* – М.: Радио и связь, 1985.

Поступила в редакцию 19 мая 2008 г.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИЕМА РАДИОСИГНАЛОВ ОТ ПРИБОРОВ УЧЕТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В ЖИЛЫХ КВАРТИРАХ НА ФОНЕ ПОМЕХ ПУТЕМ ИХ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Ю.Т. Карманов, А.Ю. Карманов

Предложен и исследован способ подавления помех в системе передачи информации по радиоканалам от приборов учета энергоресурсов в жилых квартирах путем их дополнительной частотной модуляции.

Ключевые слова: приборы учета, энергоресурсы, частотная модуляция.

Для организации автоматизированного индивидуального учета потребления энергоресурсов в квартире жилого дома необходимо обеспечить передачу информации от первичных датчиков (температуры теплоносителя, расхода теплоносителя, потребленной электроэнергии, воды и т.п.), установленных в каждой квартире на общедомовой пункт учета энергоресурсов и расчетов платежей.

В квартире типового жилого дома может находиться до десяти первичных датчиков. В типовом жилом доме необходимо систематически собирать информацию на общедомовом пункте учета с нескольких тысяч первичных датчиков. При этом система сбора с первичных датчиков должна быть не дорогой, простой в эксплуатации.

Один из вариантов построения такой системы сбора информации основывается на «асинхронных» радиодатчиках с простыми маломощными радиопередатчиками на фиксированной несущей частоте, которые систематически в соответствии с автономными часами излучают кодированные радиопосылки, содержащие информацию о номере датчика и значении регистрируемого параметра. На общедомовом пункте учета находится радиоприемное устройство, которое должно обеспечивать устойчивый прием радиосигналов от радиодатчиков, декодировать информацию о номере датчика и значении регистрируемого параметра. При этом обратный канал связи от приемного устройства к каждому радиодатчику отсутствует. На основе этой информации специализированная биллинговая система производит расчеты энергозатрат по каждой квартире и необходимые платежи.

Практическая реализация описанного способа требует обеспечения устойчивого приема слабой радиопосылки от датчика на фоне помех, обуслов-

ленных как работой большого количества радиодатчиков в доме на одной и той же несущей частоте, так и наличием в жилом доме других радиоизлучений.

В настоящей статье исследуется возможность подавления помехи на входе приемного устройства общедомового пункта учета путем дополнительной частотной модуляции радиопосылок датчиков.

1. Способ подавления проникающей помехи на входе радиоприемного устройства путем частотной модуляции радиопосылок

Когда существует возможность получения в радиоприемном устройстве точной копии помехового колебания, то помеха на входе радиоприемного устройства подавляется простым вычитанием копии помехи из принимаемой смеси помехи и радиопосылки. Как известно [1] дополнительная модуляция излучаемого радиокосебания с последующей модуляцией (демодуляцией) на приемной стороне приводит к частичному подавлению этого радиокосебания. Поэтому, подвергая излучаемые радиопосылки частотной модуляции с последующей частотной модуляцией смеси помехи и радиопосылки можно добиться в ней подавления радиопосылки и получить практически точную копию помехового колебания. Вычитая ее из входной смеси помехи и радиопосылки подавить проникающую помеху.

Схема организации подавления проникающей помехи описанным способом приведена на рис. 1, где используются обозначения: 1 – радиодатчик; 2 – ЧМ-модуляторы; 3 – генераторы модуляций; 4 – канал распространения радиопосылки по дому; 5 – полосовые фильтры на частотах $f_0, f_0 + 2F_m$; 6 – устройство переноса частот, выравнивания амплитуд, фаз; 7 – вычитающее устройство; 8 – приемное устройство общедомового пункта учета.

Процесс подавления помехи состоит из нескольких этапов.

На первом этапе, сформированная радиодатчиком радиопосылка $U_c(t) = \text{Re}\{\dot{U}_c(t)e^{j2\pi f_0 t}\}$ с комплексной огибающей $\dot{U}_c(t)$ и несущей частотой

Карманов Юрий Трофимович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой цифровых радиотехнических систем ЮУрГУ; ea@drts.susu.as.ru.

Карманов Алексей Юрьевич – подполковник, преподаватель Челябинского высшего авиационного училища штурманов, соискатель при кафедре конструирования и производства радиоаппаратуры ЮУрГУ; ea@drts.susu.ac.ru.

той f_0 дополнительно модулируется по частоте колебанием с комплексной огибающей $\dot{U}_{м1}(t) = e^{jm \cos 2\pi F_M t}$. Здесь m – индекс модуляции, F_M – частота модуляций.

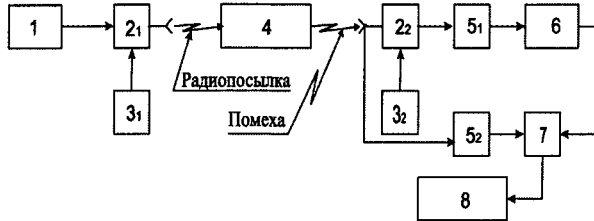


Рис. 1. Схема организации подавления

В результате излучается модулированная радиопосылка вида:

$$U_{см}(t) = \text{Re} \left\{ \dot{U}_c(t) e^{j[2\pi f_0 t + m \cos 2\pi F_M t]} \right\}. \quad (1)$$

На втором этапе, радиопосылка распространяясь по жилому дому по многим (M) путям (лучам) достигает приемной антенны приемного устройства общедомового пункта учета. В результате на выходе антенны формируется смесь проникающей помехи $U_{п}(t) = \text{Re} \left\{ \dot{U}_{п}(t) e^{j2\pi f_0 t} \right\}$ с комплексной огибающей $\dot{U}_{п}(t)$ и радиосигнал посылки $U_{спр}(t) = \text{Re} \left\{ \dot{U}_{спр}(t) e^{j2\pi f_0 t} \right\}$ с комплексной огибающей вида [2]:

$$\dot{U}_{спр}(t) = \sum_{k=1}^M [L_p(k)]^{-1} \dot{\eta}_k e^{-j2\pi f_0 \tau_k} \times \dot{U}_c(t - \tau_k) e^{jm \cos[2\pi F_M(t - \tau_k)]}, \quad (2)$$

где обозначено: $L_p(k)$, τ_k – затухания и задержки радиопосылки при распространении от антенны радиодатчика до антенны приемного устройства по k -му пути; $\dot{\eta}_k$ – случайная комплексная величина, учитывающая случайные флуктуации радиопосылки по амплитуде и фазе при распространении по k -му пути.

На третьем этапе смесь проникающей помехи и радиопосылки модулируется по частоте колебанием с комплексной огибающей

$$\dot{U}_{м2}(t) = e^{-jm \cos 2\pi F_M(t - \tau_3)}.$$

В результате получаем колебание $U_{\Sigma m}(t)$ вида:

$$U_{\Sigma m}(t) = \text{Re} \left\{ \dot{U}_{пм}(t) e^{j2\pi f_0 t} \right\} + \text{Re} \left\{ \dot{U}_{спрм}(t) e^{j2\pi f_0 t} \right\}; \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{пм}(t) = \dot{U}_{п}(t) e^{-jm \cos[2\pi F_M(t - \tau_3)]}, \\ \dot{U}_{спрм}(t) = \sum_{k=1}^M [L_p(k)]^{-1} \dot{\eta}_k e^{-j2\pi f_0 \tau_k} \times \\ \times e^{jm[\cos 2\pi F_M(t - \tau_k) - \cos 2\pi F_M(t - \tau_3)]} \dot{U}_c(t - \tau_k). \end{cases} \quad (4)$$

Величина τ_3 регулируется для достижения высокой степени подавления помехи. Представим $e^{j\rho \cos z}$ в виде ряда по функциям Бесселя [3].

$$e^{j\rho \cos z} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} e^{-j|i \cdot z|} e^{j\pi i/2} J_i(\rho). \quad (5)$$

Тогда частотно-модулированную смесь проникающей помехи и радиопосылки можно представить в виде многочастотного колебания вида:

$$U_{\Sigma m}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \text{Re} \left\{ [U_{п}(t) \dot{k}_{п}(i) + \dot{U}_c(t) \dot{k}_c(i)] e^{j2\pi(f_0 + iF_M)t} \right\}; \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{K}_{п}(0) = J_0(-m); \\ \dot{K}_c(0) = \sum_{k=1}^M (L_p(k))^{-1} \dot{\eta}_k e^{-j2\pi f_0 \tau_k} \times \\ \times J_0(2m \sin \pi F_M(\tau_3 - \tau_k)); \\ \dot{K}_{п}(i) = 2J_i(+m) e^{j\pi i/2} e^{j2\pi i(F_M \tau_3)}; \\ \dot{K}_c(i) = 2 \sum_{k=1}^M (L_p(k))^{-1} \dot{\eta}_k e^{-j2\pi f_0 \tau_k} \times \\ \times J_i(2m \sin \pi i F_M(\tau_3 - \tau_k)) e^{j\pi i[F_M(\tau_p + \tau_k)]}. \end{cases} \quad (7)$$

На четвертом этапе из многочастотного колебания (6) полосовым фильтром с центральной частотой $f_0 + zF_M$ и полосой пропускания равной ширине спектра радиопосылки отфильтровывают составляющую $U_{\Sigma z}(t)$ на частоте $f_0 + zF_M$.

Она равна

$$U_{\Sigma z}(t) = \text{Re} \left\{ [\bar{U}_{п}(t) \dot{k}_{п}(z) + \dot{U}_c(t) \dot{k}_c(z)] e^{j2\pi(f_0 + zF_M)t} \right\}, \quad z = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (8)$$

где $\bar{U}_{п}(t)$ – комплексная огибающая проникающей помехи на выходе полосового фильтра с центральной частотой f_0 и полосой пропускания равной ширине спектра радиопосылки.

Одновременно из немодулированной смеси помехи и радиопосылки полосовым фильтром с центральной частотой f_0 фильтруется колебание

$$\tilde{U}_{вх}(t) = \text{Re} \left\{ [\tilde{U}_{п}(t) + \dot{U}_c(t)] e^{j2\pi f_0 t} \right\}.$$

На пятом этапе колебание $U_{\Sigma z}(t)$ переносят на частоту $-f_0$. Одновременно выравнивают амплитуду и фазу этого колебания путем умножения его комплексной огибающей на величину $K_{\text{ком}} = \dot{K}_{\Delta}(z) / \dot{K}_{п}(z)$. Величина $\dot{K}_{\Delta}(z) \approx 1$ моделирует неидеальность выравнивания амплитуды и фазы помеховой составляющей $U_{\Sigma z}(t)$ с помеховой составляющей $\tilde{U}_{п}(t)$ на выходе полосового фильтра с центральной частотой f_0 .

Выровненное по амплитуде и фазе колебание имеет вид

$$\tilde{U}_{\Sigma z}(t) = \text{Re} \left\{ [\tilde{U}_{п}(t) \dot{K}_{\Delta}(z) + \dot{K}_c(z) / \dot{K}_{п}(z) \times \dot{K}_{\Delta}(z) \dot{U}_c(t)] e^{j2\pi f_0 t} \right\}. \quad (9)$$

На шестом этапе колебание $\tilde{U}_{\Sigma z}(t)$ вычитается из колебания $\tilde{U}_{\text{вх}}(t)$, которое образуется путем фильтрации смеси помехи и модулированной по частоте радиопосылки полосовым фильтром с центральной частотой f_0 и полосой пропускания, совпадающей с шириной спектра радиопосылки.

$$\tilde{U}_{\text{вх}}(t) = \tilde{U}_{\text{пвх}}(t) + \tilde{U}_{\text{свх}}(t),$$

где $\tilde{U}_{\text{пвх}}(t)$ – часть проникающей помехи не подавленной полосовым фильтром.

Для нахождения $\tilde{U}_{\text{свх}}(t)$ разложим в выражении (2) функцию $e^{jm \cos(2\pi F_m(t-\tau_k))}$ в ряд Фурье и перепишем его в виде:

$$\begin{cases} U_{\text{свр}}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \text{Re} \left\{ e^{j2\pi(f_0 + iF_m)t} \dot{U}_{\text{свр}}(i) \right\}; \\ \dot{U}_{\text{свр}}(t) = \sum_{k=1}^M (L_p(k))^{-1} \dot{\eta}_k e^{-j2\pi f_0 \tau_k} \times \\ \times J_i(m) e^{-j2\pi F_m \tau_k} \dot{U}_c(t - \tau_k). \end{cases} \quad (10)$$

Тогда выражение для $\tilde{U}_{\text{свх}}(t)$ будет совпадать с членом ряда (5) при $i = 0$.

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{\text{свх}}(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_0 t} \left[\sum_{k=1}^M (L_p(k))^{-1} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \dot{\eta}_k e^{-j2\pi f_0 \tau_k} J_0(m) \dot{U}_c(t - \tau_k) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда после вычитания из $\tilde{U}_{\text{вх}}(t)$ колебания $\tilde{U}_{\Sigma z}(t)$ остаточное колебание $U_{\Delta}(t)$ будет иметь вид:

$$\begin{aligned} U_{\Delta}(t) &= \tilde{U}_{\text{вх}}(t) - \tilde{U}_{\Sigma z}(t) = \\ &= \text{Re} \left\{ \tilde{U}_{\text{п}}(t) \dot{k}_{\Delta} (1 - \dot{k}_{\Delta}) + \dot{U}_c(t) \dot{R}_{\Delta} \right\}; \\ \dot{R}_{\Delta} &= \sum_{k=1}^M (L_p(k))^{-1} \dot{\eta}_k e^{-j2\pi f_0 \tau_k} \left[J_0(m) - \right. \\ &\left. - \dot{k}_{\Delta} \frac{J_z(2m \sin[\pi z F_m(\tau_3 - \tau_k)])}{J_z(m)} e^{j2\pi z(\tau_k - \tau_3 - \pi/2)} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

2. Исследование эффективности проникающей помехи путем частотной модуляции радиопосылок и помех

Эффективность подавления проникающей помехи будем оценивать отношением $d^2(z) = \frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$ равным отношению средних мощностей радиопосылки и неподдавленного остатка помехи на входе радиоприемного устройства.

Используя (12) запишем:

$$d^2(z) = \frac{M \left[\left| \dot{U}_c(t) \dot{R}_{\Delta} \right|^2 \right]}{M \left[\left| \dot{U}_{\text{п}}(t) (1 - k_{\Delta}) \right|^2 \right]}.$$

$d^2(z)$ представим в виде:

$$d^2(z) = d_0^2 T(z).$$

Через d_0^2 обозначено исходное отношение $\frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$ на входе радиоприемного устройства при отсутствии частотной модуляции радиопосылок. Оно равно:

$$d_0^2 = \frac{P_c \sum_{k=1}^M (L_p(k))^{-1} \sigma_k^2}{\tilde{P}_{\text{п}}}, \quad (13)$$

где: P_c – мощность радиопосылки, излучаемая радиодатчиком; σ_k^2 – дисперсия флюктуаций амплитуды радиопосылки при распространении по k -му пути; $\tilde{P}_{\text{п}}$ – средняя мощность части проникающей помехи, совпадающей по спектру со спектром частот радиопосылки.

Через $T(z)$ обозначен коэффициент, показывающий во сколько раз увеличится отношение $\frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$ из-за частотной модуляции радиопосылок. Используя выражения (9)–(12) представим его в виде:

$$T(z) = T_1(k_{\Delta}) T_2(z) T_3(z),$$

где:

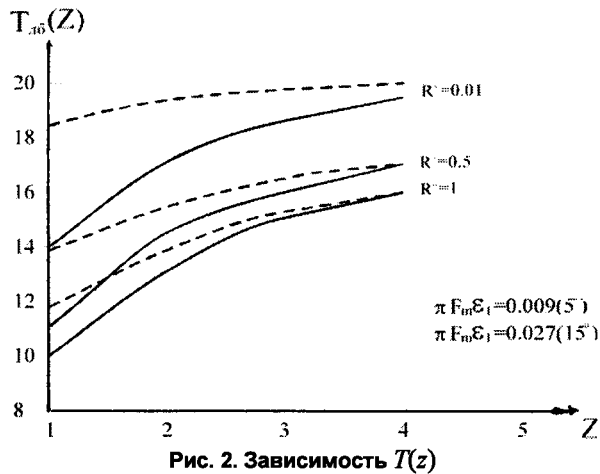
$$\begin{cases} T_1(k_{\Delta}) = |1 - k_{\Delta}|^{-2}; \\ T_2(z) = \left[\sum_{k=1}^M (L_p(k))^{-2} \sigma_k^2 \right]^{-1}; \\ T_3(z) = \sum_{k=1}^M (L_p(k))^{-2} \sigma_k^2 |J_0(m) - \\ - \frac{J_z(2m \sin \pi z F_m(\tau_3 - \tau_k))}{J_z(m)} e^{-j\pi z [F_m(\tau_3 - \tau_k) - \pi/2]}|^2. \end{cases}$$

На рис. 2 приведены графики зависимостей $\Delta T_{\text{дб}}(z) = 10 \lg T(z)$ от z при различных значениях параметров $R_1^2 = L_p(2)/L_p(1)$; $F_m \varepsilon_1 = F_m(\tau_3 - \tau_1)$; $F_m \Delta \tau = F_m(\tau_2 - \tau_1)$; $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 1$.

Расчеты проводились для случая распространения радиопосылки по двум путям ($M=2$), при этом предполагалось, что неидеальности выравнивания амплитуд и фаз помехи перед вычитанием таковы, что $10 \lg T_1(k_{\Delta}) = 20$ дБ.

Кроме того, в расчетах фиксировалось значение $F_m \varepsilon_1 + F_m \Delta \tau = 0,44$, что соответствует сдвигу фазы на 25° . Расчеты не выявили зависимости $T(z)$ от индекса частотной модуляции для $m \leq 0,5$.

Из приведенных на рис. 2 графиков видно, что при выборе параметра $z = 3$ и управлении задержкой τ_3 модулирующего колебания $\dot{U}_{m2}(t)$ таким образом, чтобы значение $\pi F_m \varepsilon_1 = \pi F_m(\tau_3 - \tau_1)$ не превышало $0,027$ (15°) можно достичь хорошего подавления помехи (20 дБ).



При этом эффективность подавления помехи в основном определяется точностью выравнивания

амплитуды и фазы копии помехового колебания с действующей помехой.

Литература

1. Карманов, А. Ю. Модуляционные методы приема слабых сигналов на фоне взаимных помех / А. Ю. Карманов // Цифровые радиотехнические системы. – 2001. – Вып. 3. – Режим доступа: <http://www.drts.susu.ac.ru>, свободный.

2. Карманов, А. Ю. Математические модели радиосигналов и помех в задачах обеспечения приема радиосигналов во время излучения электромагнитных колебаний / А. Ю. Карманов // Цифровые радиотехнические системы. – 2005. – Вып. 6. – Режим доступа: <http://www.drts.susu.ac.ru>, свободный.

3. Кратиер, А. Трансцендентные функции / А. Кратиер, В. Франц. – М.: Наука, 1963.

Поступила в редакцию 19 мая 2008 г.

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА ИМПУЛЬСНОГО ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЕГО РАБОТЫ

А.Б. Дегтярь, В.И. Панферов

В статье описываются наиболее вероятные пути экономии тепловой энергии при импульсном режиме отопления зданий, механизм проектирования импульсного отопления, а также описывается математическая модель управления данным режимом функционирования отопления.

Ключевые слова: *отопление зданий, импульсное отопление, режимы отопления, экономия тепловой энергии.*

Снижение затрат энергии на обеспечение микроклимата в зданиях и сооружениях является весьма актуальной проблемой. Её грамотное решение может быть выполнено лишь на основе всестороннего анализа теплоэнергетического процесса, реализуемого в здании. При этом под теплоэнергетическим процессом понимается последовательная цепь взаимообусловленных энергетических превращений, связанных с переносом внутренней энергии (теплоты) от источника в окружающую среду.

1. Построение алгоритма реализации импульсного режима отопления зданий

Теоретическое обоснование закономерностей формирования теплового режима зданий и сооружений позволяет грамотно подходить к его моделированию, исследованию и оптимизации. При этом основной целью оптимизации данного режима является снижение затрат энергии на обеспечение микроклимата в зданиях и сооружениях.

В связи с этим разработан алгоритм импульсного отопления зданий [1]. Целесообразность такого направления работы обусловлена тем, что импульсный режим отопления промышленных печей, как это достаточно достоверно установлено, характеризуется, в частности, заметной экономией тепловой энергии. Поэтому вполне оправданным является и ожидание того, что применение такого режима для отопления зданий также будет энергетически выгодным. Предполагается, что импульсное отопление целесообразно применять в следующих случаях.

1. При теплоснабжении здания от тепловых сетей. Данный вид теплоснабжения осуществляется по существующему температурному графику, согласно которому температура теплоносителя в тепловой сети зависит от температуры наружного воздуха. И существует, так называемая, срезка температурного графика, ниже которой темпера-

тура в тепловой сети не регулируется. В этом случае целесообразно применять местное импульсное отопление с целью экономии тепла.

2. График качественного регулирования тепловых сетей рассчитан на характеристики, так называемого, усредненного здания с радиаторной системой отопления. Вместе с тем теплотехнические характеристики конкретного здания могут выгодно отличаться от усредненных характеристик, поэтому применение импульсного отопления приведет к экономии тепловой энергии.

Также во время действия импульса через систему отопления пропускается расчетный расход теплоносителя, а во время паузы расход теплоносителя равен нулю. Этим самым исключается возможность гидравлической разрегулировки системы отопления. Кроме того, как показали исследования последних лет [2], изменение параметров воздуха с определенной частотой благоприятно воспринимается человеком – снижает утомляемость и повышает производительность труда. Такая концепция получила название «динамического микроклимата», под которым понимается периодическое колебание параметров воздуха в помещении около их средних значений. Данные колебания могут наблюдаться в период включения и отключения системы отопления, то есть работе ее в импульсном режиме. Скважность импульсов (отношение длительности включения ко всему периоду) определяется, исходя из текущей тепловой потребности отапливаемого здания. При этом используется разработанная модель отопительного прибора [3]. Для оценки качества регулирования температуры внутреннего воздуха необходима разработка математической модели теплового режима здания, включающей подсистему импульсного управления.

Рассмотрим режим функционирования импульсного отопления в период срезки температурного графика. Периодом срезки будем считать период, когда температура в подающей линии тепловых сетей не поддерживается ниже 70 °С. В данном случае наиболее подходящим будет импульсное регулирование, когда через систему отопления пропускается всегда расчетный расход, а количество передаваемо-

Дегтярь Александр Борисович – аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции ЮУрГУ; tgshiv@susu.ac.ru.

Панферов Владимир Иванович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции ЮУрГУ; tgshiv@susu.ac.ru.

го тепла регулируется длительностью включения и выключения системы в зависимости от температуры наружного воздуха. Такой способ является наиболее эффективным, так как количественное регулирование привело бы к разрегулировке системы отопления, а качественное регулирование невозможно.

Систему отопления конкретного здания можно условно заменить эквивалентным отопительным прибором. Параметры эквивалентного отопительного прибора можно найти следующим образом. Во-первых, необходимо вычислить расчетные теплотери здания. Для этого используется известная формула:

$$Q_p = q_0 V (t_b - t_{np}), \quad (1)$$

где q_0 – удельные теплотери здания; V – объем помещения; t_b – температура воздуха в помещениях; t_{np} – расчетная температура наружного воздуха для зимнего периода.

Далее известно, что коэффициент теплопередачи отопительных приборов можно вычислять по соотношению:

$$K_{np} = m \left(\frac{t_{вх} + t_{вых}}{2} - t_b \right)^n, \quad (2)$$

где m и n – экспериментальные числовые коэффициенты, зависящие от типа прибора и характера циркуляции в нем воды; $t_{вх}$ – температура теплоносителя на входе в отопительный прибор; $t_{вых}$ – температура теплоносителя на выходе из отопительного прибора.

Затем, для того типа отопительных приборов, которые установлены в конкретном здании по параметрам расчетного режима следует найти коэффициент теплопередачи K по формуле (2).

Площадь отопительного прибора F , как известно, можно найти используя следующую зависимость:

$$F_{np} = \frac{Q_p}{\left[\frac{(t_{вхр} + t_{выхр})}{2} - t_a \right] K_{np}}, \quad (3)$$

где $t_{вхр}$ – температура теплоносителя на входе в отопительный прибор в расчетном режиме; $t_{выхр}$ – температура теплоносителя на выходе из отопительного прибора в расчетном режиме.

Нами установлено, что распределение температуры по площади поверхности отопительного прибора имеет вид [3]:

$$t(F) = t_b + (t_{вх} - t_b) \exp \left(- \frac{K_{np} F_{np}}{G_{расч} c} \right), \quad (4)$$

где K_{np} – коэффициент теплопередачи отопительного прибора; F_{np} – площадь поверхности отопительного прибора; c – теплоемкость теплоносителя; $G_{расч}$ – массовый расчетный расход теплоносителя.

Мощность отопительного прибора определяется по формуле:

$$Q = cG(t_{вх} - t_{вых}), \quad (5)$$

где $t_{вых}$ – температура теплоносителя на выходе из отопительного прибора.

Подставив (4) в (5) и полагая под F всю площадь поверхности отопительного прибора найдем количество тепла, которое подается в период срезы температурного графика:

$$Q_{cp} = cG_{расч} (t_{вх} - t_b) \left[1 - \exp \left(- \frac{K_{расч} F_{расч}}{cG_{расч}} \right) \right]. \quad (6)$$

Тепловые потери здания при температуре наружного воздуха, отличной от расчетной, можно определить следующим образом:

$$Q = Q_p \frac{t_b - t_n}{t_b - t_{np}}, \quad (7)$$

где t_n – текущая температура наружного воздуха.

Разделим (7) на (6) и получим тем самым скважность импульсов для периода «срезки» температурного графика в зависимости от температуры наружного воздуха. Скважность импульсов – это отношение времени включения системы отопления к общему периоду импульса:

$$\frac{t_{вкл}}{T} = \frac{Q_p \frac{t_b - t_n}{t_b - t_{np}}}{cG_{расч} (t_{вх} - t_b) \left[1 - \exp \left(- \frac{K_{np} F_{np}}{cG_{расч}} \right) \right]}. \quad (8)$$

Расчетный расход теплоносителя определяется по Q_p и, очевидно, равен:

$$G_{расч} = \frac{Q_{расч}}{c(t_{вхр} - t_{выхр})}. \quad (9)$$

2. Расчет и исследование работы системы отопления в импульсном режиме

Расчет производится на примере жилого здания с характеристиками. Наружная стена трехслойная: кирпич $\delta = 0,12$ м, $\lambda = 0,76$ Вт/м²С; теплоизоляция (минеральная вата) $\delta = 0,14$ м, $\lambda = 0,043$ Вт/м²С; кирпич $\delta = 0,12$ м, $\lambda = 0,76$ Вт/м²С. Площадь наружных стен 120 м². Площадь перекрытия 36 м², сопротивление теплопередаче $R_{пер} = 5,939$ м²С/Вт. Площадь окон 8 м², сопротивление теплопередаче $R_{ок} = 0,502$ м²С/Вт. Площадь двери 3 м², сопротивление теплопередаче $R_{дв} = 0,588$ м²С/Вт. Расчетная температура наружного воздуха для г. Челябинска $t_{np} = -34$ °С. Температура внутреннего воздуха в здании $t_b = 20$ °С. Температуры на входе и выходе из отопительного прибора в расчетном режиме $t_{вхр} = 95$ °С, $t_{выхр} = 70$ °С. Экспериментальные коэффициенты для чугунного секционного радиатора $m = 1$, $n = 0,3$. Удельная теплоемкость воды $c = 4187$ Дж/кгС.

На основании исходных данных найдены расчетные теплотери здания $Q_p = 3200$ Вт, коэффициент теплопередачи отопительных приборов $K = 3,46$ Вт/м²С, площадь поверхности отопительных приборов $F = 14,81$ м² и расчетный расход $G_{расч} = 0,031$ кг/с.

Пользуясь найденными данными на основании уравнения (8) построим график зависимости $t_{вкл}/T$ от t_n , изображенный на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что для периода «срезки» температурного графика, то есть в диапазоне температур $-10...+5$ °С скважность импульсов системы отопления уменьшается с увеличением температуры наружного воздуха.

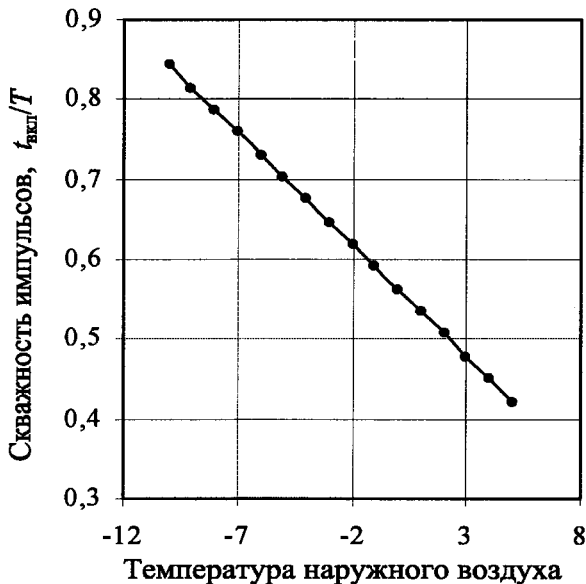


Рис. 1. График зависимости скважности импульсов от температуры наружного воздуха

Зная алгоритм проектирования импульсного отопления (скважность импульсов) можно более детально описать механизм управления импульсным режимом отопления, воспользовавшись дифференциальным уравнением, описывающим изменение температуры внутреннего воздуха в здании в импульсном режиме. В работе [4] с использованием разработок Е.Я. Соколова [5] найдена структура математической модели теплового режима помещения:

$$T \frac{dt_b}{d\tau} + t_b = kW_0 + T \frac{dt_n}{d\tau} + t_n, \quad (10)$$

где k – коэффициент передачи по каналу «мощность системы отопления – температура внутреннего воздуха»;

$$k = \frac{1}{q_0 V}, \quad (11)$$

T – постоянная времени:

$$T = \frac{c\rho F\delta}{q_0 V} \left(\frac{\delta}{2R\lambda} + \frac{1}{\alpha_n R} \right), \quad (12)$$

где δ , R – соответственно толщина и термическое сопротивление теплопередаче наружной стены здания; λ – коэффициент теплопроводности материала стены; α_n – коэффициент теплоотдачи для наружной стены здания; F – площадь наружных стен здания.

При $t_n = \text{const}$, уравнение (10) перепишется в следующем виде:

$$\frac{dt_b}{d\tau} = \frac{1}{T} (t_n - t_b + kW_0), \quad (13)$$

Для численного решения уравнения (13) использовался метод Рунге–Кутты, при этом полагалось постоянство температуры наружного воздуха ($t_n = 3$ °С). Начальная температура внутреннего воздуха принималась равной 20 °С. Пользуясь исходными данными для жилого здания, изложенными выше, нашли $T = 83\,925$ с; $k = 0,0169$; $W_0 = Q_{ср} = 2070,6$ Вт; при $t_n = 3$ °С: $Q = 1007$ Вт.

Численное решение поставленной задачи получено с применением компьютерной программы MathCAD. Результаты расчета изменения температуры внутреннего воздуха t_b во времени при импульсном режиме отопления приведены на рис. 2.

По нашим оценкам качество регулирования температуры внутреннего воздуха получается достаточно приемлемым. При этом в установившемся режиме t_b колебалась в пределах от 19,55...19,85 °С. Некоторое несоответствие средней температуры внутреннего воздуха расчетному значению 20 °С вероятнее всего обуславливается несовершенством методик расчета. Так например, рис. 2 построен для расчетной скважности импульсов, которая равна $t_{вкл}/T = 0,477$ для $t_n = 3$ °С. Однако, при увеличении скважности импульсов отклонение средней температуры внутреннего воздуха от расчетного значения уменьшается. Если вместо $t_{вкл}/T = 0,477$ принять $t_{вкл}/T = 0,485$ отклонение температуры от заданного значения будет равно нулю.

Также прослеживается зависимость, что при уменьшении периода следования импульса T , амплитуда колебаний t_b уменьшается. Так при $T = 1$ ч, амплитуда колебаний t_b равна 0,3 °С, а при $T = 0,5$ ч, амплитуда колебаний t_b равна 0,2 °С.

Применение импульсного отопления для периода, когда наблюдается перетоп помещения, то есть температура внутреннего воздуха равна $t_b = 25$ °С, позволяет ликвидировать этот перетоп и выйти на расчетный режим. График этой зависимости изображен на рис. 3.

Если бы импульсное отопление не применялось, то дифференциальное уравнение, описывающее изменение t_b было бы следующим:

$$T \frac{dt_b}{d\tau} = t_n - t_b + kcG_{расч} (t_{вк} - t_b) \left[1 - \exp\left(-\frac{K_{пр} F_{пр}}{cG_{расч}}\right) \right]. \quad (14)$$

Решая это дифференциальное уравнение найден график изменения температуры внутреннего воздуха. Этот график приведен на рис. 4.

Из графика видно, что в установившемся режиме превышение температуры внутреннего воздуха над заданным значением (20 °С) составляет 11 °С.

Используя дифференциальное уравнение (14) можно более точно рассчитать температуру внутреннего воздуха, которая установится в помещении ($t_{бы}$), а также оценить экономию тепла при ис-

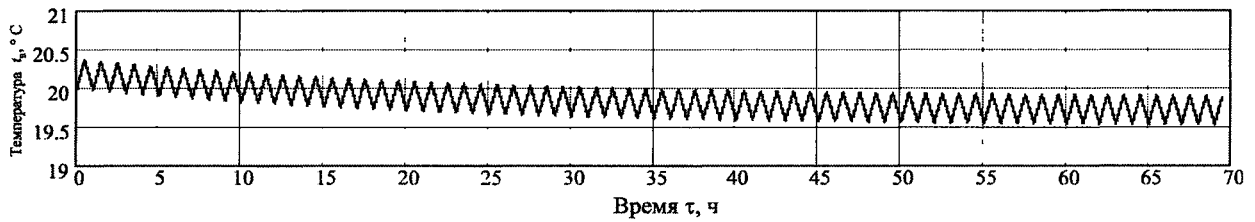


Рис. 2. График изменения температуры внутреннего воздуха во времени при использовании режима импульсного отопления

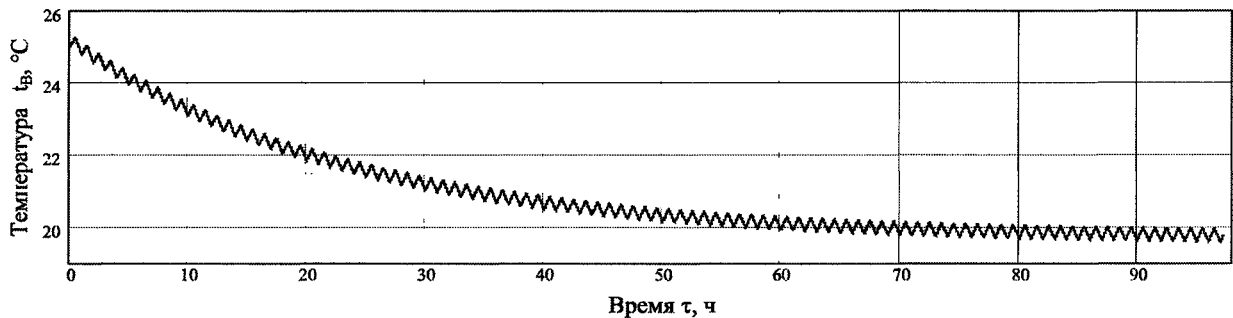


Рис. 3. График изменения температуры внутреннего воздуха во времени при использовании режима импульсного отопления при превышении фактической температуры в помещении над заданной

пользовании импульсного отопления. Выражение для $t_{\text{вы}}$, будет иметь вид:

$$t_{\text{вы}} = \frac{t_{\text{н}} + kcG_{\text{расч}}t_{\text{вх}} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_{\text{пр}}F_{\text{пр}}}{cG_{\text{расч}}}\right) \right]}{1 + kcG_{\text{расч}} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_{\text{пр}}F_{\text{пр}}}{cG_{\text{расч}}}\right) \right]} \quad (15)$$

Вычислив $t_{\text{вы}}$ по формуле (15), получаем, что $t_{\text{вы}} = 30,933 \text{ } ^\circ\text{C}$.

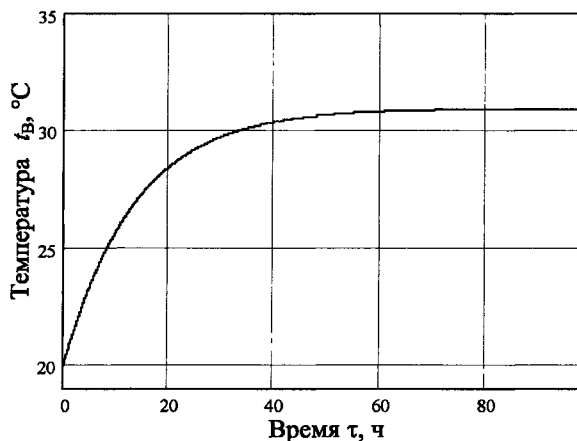


Рис. 4. График изменения температуры $t_{\text{в}}$ во времени без импульсного отопления

Заключение

В установившемся режиме расход теплоты следует вычислять по формуле (6), подставляя в нее $t_{\text{вы}}$. Тогда подставив значение $t_{\text{вы}}$ в уравнение (6), получаем: $Q_{\text{у}} = 1653 \text{ Вт}$. А расход теплоты при

применении импульсного режима отопления равен $Q_{\text{н}} = Q_{\text{ср}}(t_{\text{вкл}}/T) = 2070,6 \cdot 0,477 = 987,4 \text{ Вт}$.

То есть при использовании импульсного отопления экономия теплоты составляет 665,6 Вт.

Литература

1. Панферов, В. И. Исследование режима импульсного отопления / В. И. Панферов, А. Б. Дегтярь // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Магнитогорск: МГТУ, 2006.
2. Калмаков, А. А. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции: учебник для вузов / А. А. Калмаков. – М.: Стройиздат, 1986. – 479 с.
3. Панферов, В. И. Погрешность определения среднего значения температурного напора отопительного прибора / В. И. Панферов, А. Б. Дегтярь, Ю. Н. Денисенко // Материалы 5-й Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – Т. 1.
4. Нагорная, А. Н. Моделирование и управление тепловым режимом здания / А. Н. Нагорная, В. И. Панферов, Е. Ю. Пашина // Материалы Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». – М.: МГСУ, 2005. – 280 с.
5. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е. Я. Соколов. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 472 с.

Поступила в редакцию 11 октября 2007 г.

ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СЕТЯХ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ИХ АККУМУЛИРОВАНИЯ

Д.А. Шнайдер

В статье рассматривается подход к оперативному управлению потоками энергетических ресурсов в производственных сетях с учетом динамики их аккумуляции на основе использования математической модели. Приводится пример реализации предложенного подхода к управлению для системы пароснабжения крупного металлургического предприятия.

Ключевые слова: оперативное управление, энергетические ресурсы, производственные сети, аккумуляция ресурсов.

Современные сложные технические системы, к которым относятся, например, системы пароснабжения крупных производственных предприятий, представляют собой комплекс различных подсистем, выполняющих определенные функции и связанных между собой процессами динамического взаимодействия на основе аккумуляции и передачи энергией. Указанные системы являются нелинейными, многомерными и многосвязными, в которых протекают сложные переходные процессы и возникают критические и хаотические режимы. Поэтому задача оперативного управления потоками энергетических ресурсов в такого рода динамических системах является весьма актуальной, однако теоретически и практически крайне сложной.

Существующие теории и практика управления подобными системами используют в основном методы централизованного внешнего воздействия на различные объекты. Другим современным подходом к управлению сложными многосвязными системами является синергетическое управление, в основе которого лежит принцип самоорганизации систем. Однако независимо от используемых методов эффективное управление подобными системами требует получения достоверной прогнозной информации о состоянии системы, позволяющей формировать оперативные управляющие воздействия в соответствии с заданными критериями управления.

Решение данной задачи основано на создании в рамках традиционных АСУТП автоматизированных подсистем оперативного управления, позволяющих путем использования математических моделей, учитывающих динамику выработки, аккумуляции и потребления энергетических ресурсов в производственных сетях, осуществлять эффективное управление сложными многосвязными системами в режиме советчика диспетчерам.

Далее рассмотрим возможную реализацию указанного подхода к оперативному управлению

потоками энергетических ресурсов на примере системы пароснабжения промплощадки ККЦ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

1. Структурная схема и особенности функционирования системы пароснабжения промплощадки ККЦ ОАО «ММК»

Укрупненная структурная схема системы пароснабжения промплощадки ККЦ ОАО «ММК» приведена на рис. 1. Система пароснабжения включает в себя: источники пара – ПЭВС-2, ЦЭС, котельная № 2, котлы ОКГ кислородных конвертеров; потребителей пара – вакууматор, электростанция ST-3, цеха ЛПЦ 6–8 и др. потребители; энергокорпус (ЭК) с пароаккумуляторами, пароперегревающую установку (ППУ), систему перераспределения пара (СПП) между вакууматором и другими потребителями и протяженные паровые сети, обладающие собственной аккумулялирующей способностью.

Проблемным вопросом пароснабжения промплощадки ККЦ является обеспечение максимальной подачи пара на электростанцию ST-3 с целью увеличения выработки электроэнергии при полном удовлетворении снабжения паром технологических потребителей.

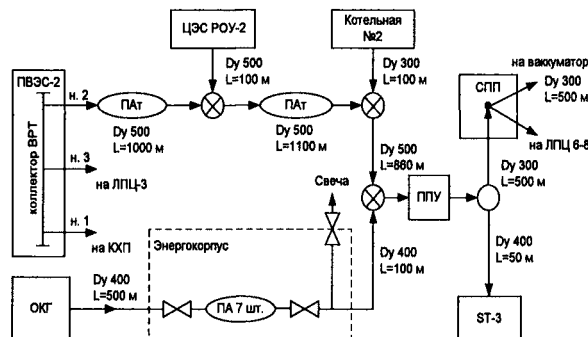


Рис. 1. Укрупненная структурная схема системы пароснабжения промплощадки ККЦ ОАО «ММК»

Основными возмущающими факторами в рассматриваемой системе пароснабжения, влияющими на пароснабжение станции ST-3, являются вакууматор и котлы ОКГ. Так, цикличность работы вакуу-

Шнайдер Дмитрий Александрович – к.т.н., доцент кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; shnyder@ait.susu.ac.ru.

матора зависит от количества плавков стали и составляет около 15 включений в сутки, продолжительность включения 20–40 мин. При этом подача пара на вакууматор в пиковом режиме достигает 40–45 т/ч, что составляет до 30 % от общего расхода пара на входе ППУ (около 150 т/ч). Котлы ОКГ утилизируют тепло, образующееся при плавках в ККЦ. Во время плавки поступление пара от 1-го котла ОКГ может составлять от 150–300 т/ч. Средняя продолжительность плавки составляет 15 мин, среднее количество – 28 плавков в сутки.

Для демпфирования пиков работы вакууматора и котлов ОКГ используются пароаккумуляторы энергокорпуса (ПА), а также аккумулирующие способности паровых сетей (ПАТ). Заряд ПА осуществляется паром от котлов ОКГ и сопровождается повышением температуры, давления и массы воды, накопленной в ПА. При разряде ПА происходит снижение давления в ПА и вторичное вскипание воды, в результате чего уровень воды в ПА снижается.

Однако объем производства пара от ОКГ является резко переменным и аккумулирующей способности ПА может быть недостаточно для аккумулирования всего пара. В этом случае оператор осуществляется вынужденный сброс пара в атмосферу через свечи в ЭК.

Графики, иллюстрирующие динамику режимов работы системы пароснабжения площадки ККЦ, приведены на рис. 2.

2. Математическое описание динамических процессов аккумулирования пара

Как уже отмечалось ранее, ключевым элементом демпфирования пиков выработки и потребления пара в системе пароснабжения промплощадки ККЦ являются паровые аккумуляторы энергокорпуса. Кроме того, протяженные паровые сети обладают собственной аккумулирующей способностью. В этой связи рассмотрим построение математической модели динамических режимов парового аккумулятора.

Принципиальная схема аккумулятора приведена на рис. 3. Как видно из рис. 3, паровой аккумулятор представляет собой цилиндрический бак, более чем наполовину наполненный водой. Входной пар поступает в водяное пространство аккумулятора через

форсунки. Отвод пара осуществляется через паропровод в верхней части бака. Для заполнения (опорожнения) бака водой, а также поддержания уровня воды в допустимых пределах при работе аккумулятора предусмотрены подпиточные трубопроводы.

Заряд аккумулятора осуществляется входным паром с массовым расходом $G_1(t)$, кг/с. Поступая в воду, пар конденсируется, отдавая тепло воде и повышая ее температуру. В результате происходит увеличение температуры, давления и массы воды в аккумуляторе. При достижении температурой воды точки кипения происходит ее вскипание и в верхней части бака образуется пар. Процесс заряда аккумулятора ограничен сверху максимальным допустимым давлением (40 кгс/см²) и максимальным допустимым уровнем воды. При этом, чем больше уровень (а значит и масса) воды, тем выше заряд аккумулятора, т.е. выше накопленная в нем тепловая энергия. Из сказанного следует, что для эффективного заряда аккумулятора необходимо автоматически ограничивать давление пара до достижения максимального допустимого уровня воды в аккумуляторе.

Разряд парового аккумулятора происходит путем подачи пара с расходом $G_2(t)$, кг/с, через разрядный паропровод. При этом вследствие снижения давления в аккумуляторе, происходит вторичное вскипание воды, в результате которого вновь образуется пар. Таким образом, разряд аккумулятора сопровождается снижением массы и уровня воды, а также температуры и давления вторичного пара. Поддержание уровня воды в аккумуляторе в допустимых пределах осуществляется путем подачи питательной воды $G_n(t)$, кг/с.

В первом приближении в качестве базового уравнения моделирования течения пара может быть использовано уравнение состояния идеального газа Клапейрона–Менделеева [1, 2]

$$p/\rho = RT, \quad (1)$$

где $R = 0,411526$ – удельная газовая постоянная, кДж/(кг·К); p – давление, Па; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; T – температура теплоносителя, °С.

На основе использования уравнения (1) запишем систему уравнения описанных выше физических процессов в ПА:

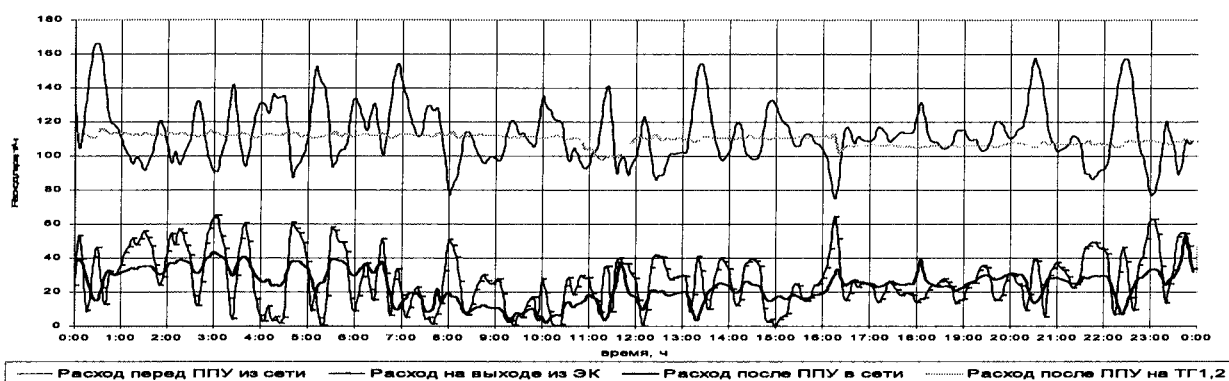


Рис. 2. Расходы пара в системе пароснабжения промплощадки ККЦ

$$\begin{cases}
 P_A(t) = RT_A(t)m_n(t)/V_n(t); \\
 V_n(t) = V_A - m_b(t)/\rho_B(T_A(t)); \\
 T_A(t) = f_n(P_A(t)); \\
 m_b(t) = \int_0^t (G_1(t) - G_2(t) + G_n(t))dt; \\
 E_A(t) = m_b(t)i_b(t) + m_n(t)i_n(t); \\
 E_A(t) = \int_0^t (Q_1(t) - Q_2(t) - Q_{nm}(t) + Q_n(t))dt; \\
 Q_1(t) = G_1(t)i_{n1}(t); \\
 Q_2(t) = G_2(t)i_{n2}(t); \\
 Q_{nm}(t) = k_n F_A (T_A(t) - T_n(t)); \\
 Q_n(t) = G_n(t)i_n(t),
 \end{cases} \quad (2)$$

где $P_A(t)$, $T_A(t)$ – давление, Па, и температура, °С, среды в паровом аккумуляторе; $m_n(t)$, $V_n(t)$ – масса, кг, и объем, м³, пара в аккумуляторе; $m_b(t)$ – масса воды в аккумуляторе, кг; $i_b(t)$, $i_{n1}(t)$, $i_{n2}(t)$, $i_n(t)$ – энтальпия, кДж/кг, воды в аккумуляторе, входящего и выходящего пара и питательной воды соответственно; $f_n(P_A(t))$ – функциональная зависимость температуры насыщенного пара, °С, от его давления, Па; $\rho_B(T_A(t))$ – функциональная зависимость плотности воды, кг/м³, от ее температуры, °С; $Q_1(t)$, $Q_2(t)$, $Q_{nm}(t)$, $Q_n(t)$ – тепловая мощность, кВт, входящего и выходящего пара, потерь в окружающую среду и подпитки соответственно; $E_A(t)$ – тепловая энергия, накопленная в аккумуляторе, кДж; V_A , F_A – объем, м³, и площадь, м² поверхности аккумулятора; k_n – коэффициент теплопередачи от поверхности бака в окружающую среду, кДж/(кг°С); $T_n(t)$ – температура наружного воздуха, °С.

3. Распределенная автоматизированная система управления пароснабжением на базе динамической программной модели

Для повышения эффективности демпфирования переменной нагрузки вакууматора и выработки пара котлами ОКГ разработана распределенная система автоматического управления пароснабжением, включающая локальные системы автоматического регулирования (САР) на источниках и потребителях пара.

При этом, так как локальные САР должны работать на единую цель – обеспечение инвариантности системы пароснабжения к переменной нагрузке вакууматора и выработке пара котлами ОКГ при максимальном повышении уровня пароснабжения станции ST-3, возникла необходимость координации их работы.

Одним из способов координации данных систем является использование оперативного диспетчерского управления с использованием программы эффек-

тивного планирования пароснабжения промплощадки, основанной на математической модели паровой сети. С этой целью разработана математическая модель системы пароснабжения промплощадки ККЦ.

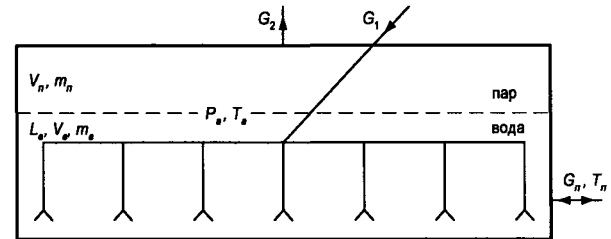


Рис. 3. Принципиальная схема парового аккумулятора

Отличительной особенностью разработанной модели является учет гидродинамики паровых потоков, связанных с аккумулярующей способностью труб и наличие пароаккумуляторов, что позволяет учитывать не только статические, но и динамические режимы пароснабжения при переменных нагрузках, а также регулирующих воздействиях от диспетчера и автоматических систем. Видеокадр моделирования режима пароснабжения рассматриваемой системы с использованием разработанной динамической модели представлен на рис. 4.

Анализ результатов моделирования режимов пароснабжения и фактических данных эксплуатации показал, что разработанная модель адекватно отражает процессы пароснабжения станции ST-3 в различных режимах работы источников и потребителей пара с достаточной для практического использования точностью.

Реализация разработанного подхода к оперативному управлению пароснабжением промплощадки ККЦ предполагает установку на каждом источнике и основных потребителях пара автоматизированных рабочих мест (АРМ) диспетчеров с экранной формой, пример которой приведен на рис. 5.

В левой части экранной формы показаны выработки пара источниками, а именно ПВЭС н.2, ЦЭС, котельной № 2 и котлами ОКГ; в правой – потребление пара вакууматором, станцией ST-3, ЛПЦ 6–8, сетевыми бойлерами и деаэраторами энергокорпуса. В центральной части расположен график изменения и прогноза ресурса пара в системе и пороговый уровень ресурса пара, поддержание которого необходимо для обеспечения требуемых параметров пара у потребителей. Ниже расположена фактические и прогнозные графики включения вакууматора и котлов ОКГ.

На основе использования программной модели в реальном времени рассчитывается ресурс пара в системе и его прогноз в зависимости от параметров и режимов источников и потребителей пара.

Программная модель использует в качестве исходных данных фактические значения параметров пара на источниках и потребителях, получаемые из существующей АСУ. Результаты расчетов по сети передаются на АРМ диспетчеров, включая

диспетчера, контролирующего работу вакууматора и котлов ОКГ. В результате каждый из диспетчеров получает возможность контролировать не только текущие значения параметров, но и прогнозируемые значения, полученные с помощью модели.

В итоге алгоритм управления системой пароснабжения может быть представлен следующим образом. Диспетчер вакууматора формирует упреждающий сигнал о начале плавки, который одновременно отображается на АРМ всех указанных источников и потребителей. Также формируется упреждающий сигнал, представляющий собой прогноз включения котлов ОКГ. На основании данных сигналов с помощью динамической модели рассчитываются прогнозные значения ресурса пара в системе, позволяющие другим источникам и потреби-

телям пара выполнить необходимые возможные действия по изменению режимов пароснабжения с тем, чтобы не допустить снижения ресурса пара в системе ниже минимального порогового уровня, обеспечивающего максимальную выработку электроэнергии на станции ST-3.

Таким образом, реализуется распределенное оперативное управление пароснабжением, при котором каждый из элементов системы может видеть состояние системы в целом, состояние и влияние каждого элемента, в том числе свое влияние на работу системы в целом.

Заключение

Эффективное управление сложными техническими системами, например, системами пароснаб-

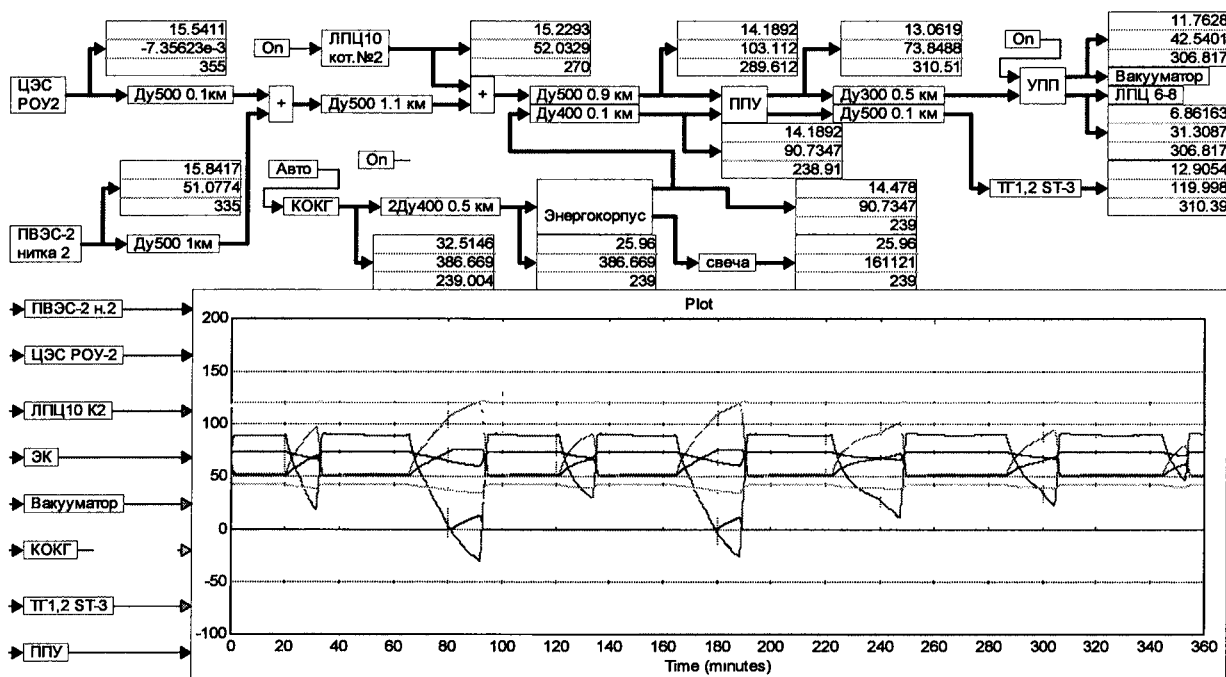


Рис. 4. Видеокадр моделирования пароснабжения промплощадки ККЦ

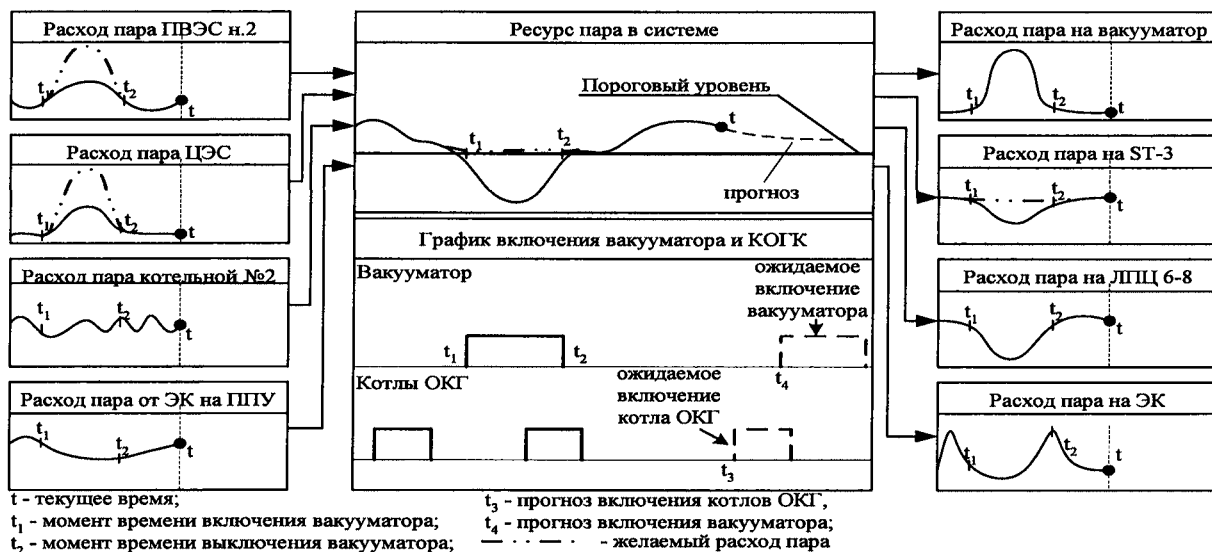


Рис. 5. Пример экранной формы АРМ диспетчеров пароснабжения промплощадки

жения крупных производственных предприятий, требует получения достоверной прогнозной информации о состоянии системы на основе использования динамической программной модели.

Для реализации оперативного управления системой пароснабжения промплощадки ККЦ ОАО «ММК» разработана математическая программная модель. Особенностью модели является учет гидродинамики паровых потоков, связанных с аккумулярующей способностью труб и паровых аккумуляторов, что позволяет учитывать не только статические, но и динамические режимы пароснабжения при переменных нагрузках, а также регулирующих воздействиях от диспетчера и автоматических систем. Апробация модели на базе данных диспетчерского управления показала целесообразность ее применения для целей анализа режимов и выбора оптимальных вариантов регулирования пароснабжения.

Предложенный подход к управлению пароснабжением промплощадки ККЦ ОАО «ММК», основанный на использовании динамической программной модели, может быть использован для оперативного управления потоками энергетических ресурсов в других производственных сетях с учетом динамики их выработки, аккумуляирования и потребления.

Литература

1. Зингер, Н. М. *Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем* / Н. М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 250 с.

2. Дейч, М. Е. *Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования* / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ В ОХЛАДИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

И.Е. Вахромеев, Ю.Б. Евчина, Д.А. Шнайдер

В статье рассмотрены вопросы общего устройства охладительных установок, возможные пути оптимизации работы охладительных устройств, а также приведена схема автоматического регулирования процессов охлаждения в градирне.

Ключевые слова: охладительные установки, электрические станции, автоматизированное управление.

На современных электрических станциях необходимым элементом оборотных систем водоснабжения являются охладительные устройства. Работа этих устройств оказывает влияние на эффективность выработки электроэнергии и, как следствие, на ее стоимость. Поэтому одной из актуальных задач является оптимизация работы систем охлаждения электрических станций.

Одним из путей решения данной задачи является автоматизация управления процессами в охладительных установках. Целью работ по автоматизации является выработка закона управления, повышающего на основании фактических данных эксплуатации (температура, расход воды и т.д.) КПД охлаждающей установки

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2 - T_{\Pi}},$$

где T_1 – температура охлажденной воды; T_2 – температура охлаждаемой воды; T_{Π} – предельная температура охлаждения (температура по мокрому термометру).

В статье дан обзор возможных способов оптимизации работы градирен электрических станций, а также предложена система автоматического управления режимами их работы.

1. Факторы, влияющие на охлаждение

Охлаждение поступающей из конденсаторов турбин воды в градирнях осуществляется конвекцией и вследствие испарения [1].

Теплообмен конвекцией зависит в основном от двух факторов: разности температур охлаждаемой воды (T_2) и воздуха (T_a); скорости движения воздуха относительно поверхности воды.

Чем меньше разность температур, тем хуже теплообмен. В пределе, когда $T_2 = T_b$, теплообмена

Вахромеев Иван Евгеньевич – начальник паросилового цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», аспирант ЮУрГУ; vakhromeev@mmk.ru.

Евчина Юлия Богдановна – магистрант кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; julia220386@yandex.ru.

Шнайдер Дмитрий Александрович – к.т.н., доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; shnyder@ait.susu.ac.ru.

конвекцией нет. Из этого следует, что теоретическим пределом охлаждения воды за счет конвекции является температура наружного воздуха.

Повышение скорости воздуха ускоряет теплообмен. При движении воды в охладительных устройствах часть ее испаряется. Испарение идет тем интенсивнее, чем меньше относительная влажность воздуха (ϕ). Величина ϕ определяется как отношение парциальных давлений водяных паров у поверхности воды и в воздухе при температуре насыщения. У поверхности воды воздух насыщен $\phi = 100\%$; над поверхностью воды воздух всегда не насыщен и $\phi < 100\%$. Поэтому испарение имеет место и в том случае, когда температура воздуха выше температуры охлаждаемой воды. Следовательно, посредством испарения воду можно охладить до температуры более низкой, чем температура окружающего воздуха.

Относительная влажность воздуха определяется по показаниям сухого и мокрого термометров. Температура мокрого термометра соответствует $\phi = 100\%$, эта температура является теоретическим пределом охлаждения воды при испарении (T_{Π}). Практически температура охлажденной воды (T_1) бывает выше на величину δ , т.е.

$$T_1 = T_{\Pi} + \delta.$$

На интенсивность охлаждения воды большее влияние оказывает скорость удаления паров воды от поверхности испарения. В этом смысле важное значение имеет скорость ветра или принудительное движение воздуха, создаваемое в охладителях.

Проведенные исследования [1] показывают, что охлаждение воды в охладительных устройствах обеспечивается в основном за счет испарения. Доля его в летние месяцы доходит до 90%, а в зимние снижается до 50%.

Таким образом, основными факторами, влияющими на охлаждение воды, являются:

1. Разность температур охлаждаемой воды и воздуха.
2. Скорость движения воздуха относительно поверхности воды.
3. Относительная влажность воздуха.

2. Устройство и основные характеристики градирен

В качестве охлаждающих устройств на электростанциях применяются градирни различных типов и мощности. Основное достоинство градирен заключается в том, что для их размещения требуется значительно меньшая площадь по сравнению с другими типами охладителей.

Охлаждение воды в градирнях интенсифицируется встречным движением воздуха. По способу организации движения воздуха градирни делятся на *башенные*, *вентиляторные* и *открытые*. В башенных градирнях ток воздуха создается высокой башней за счет соответственной тяги, в вентиляторной – вентилятором, а в открытой – вследствие обтекания ветром.

Далее рассмотрим устройство и основные характеристики башенных градирен, являющихся наиболее сложными объектами в плане оптимизации режимов и управления. Общий вид башенной градирни приведен на рис. 1.

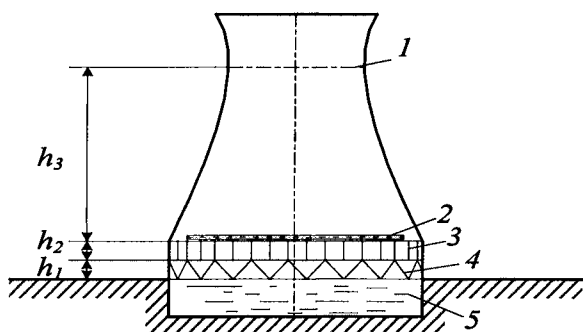


Рис. 1. Основные зоны башенной испарительной градирни:

- 1 – горловина башни;
- 2 – водораспределительное устройство;
- 3 – оросительное устройство;
- 4 – подоросительное пространство;
- 5 – водосборный бассейн

На уровне земли в стенках башен предусматриваются окна для поступления воздуха (зона h_1). Выше окон на опорном поясе располагается оросительное устройство (зона h_2). Верхняя часть башни служит для создания тока воздуха (зона h_3).

Оросительное устройство состоит из большого числа реек треугольного и прямоугольного сечения, служащих для дробления потока воды на капли и струйки. По периферии оросительного устройства устанавливаются дырчатые щиты. Охлаждаемая вода подается в башню на распределительное устройство в виде радиальных желобов, располагаемых на 5–10 м выше оросительного устройства. Растекаясь по желобам, вода вытекает через имеющиеся в них отверстия, равномерно распределяясь по сечению башни. Падая на оросительное устройство, вода в виде капель и пленок стекает вниз и собирается в приемном бассейне. Отсюда вода по самотечным каналам подается к циркуляционным насосам.

По конструкции оросительного устройства градирни делятся на капельные, пленочные и капельно-пленочные. Наиболее эффективны из них пленочные и капельно-пленочные, обеспечивающие наибольшие удельные значения гидравлической и тепловой нагрузок оросителя [1].

Градирни характеризуются следующими основными параметрами:

1. Гидравлическая нагрузка G , т/ч, охлаждаемой воды. Иногда эту характеристику называют производительностью градирни.

2. Тепловая нагрузка $Q = Gc(T_2 - T_1)$, Дж/ч, где T_2 и T_1 – соответственно начальная и конечная температуры воды, °С; c – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг°С).

3. Плотность орошения G/F , м³/(м²ч), где F – площадь оросителя, являющаяся основной конструктивной характеристикой градирни.

Совершенство градирни, как теплообменного аппарата, характеризуется перепадом температуры охлаждаемой воды $\Delta T = T_2 - T_1$ и величиной $\delta = T_1 - T_{\text{т}}$, показывающей степень приближения конечной температуры воды к теоретическому пределу охлаждения. Для наиболее распространенных капельно-пленочных градирен $\Delta T = 6\text{--}12$ °С, а $\delta = 4\text{--}8$ °С.

Процесс охлаждения воды в градирне зависит от многих факторов и описывается достаточно сложными эмпирическими уравнениями. На основе уравнений разработаны номограммы, пользуясь которыми можно определить основной конструктивный размер градирни – площадь оросительного устройства, а при известной площади – температуру охлажденной воды [1].

3. Оптимизация работы башенных градирен

Особенностью башенных градирен является почти равномерное распределение воздуха внутри них и отсутствие рециркуляции теплого воздуха, что может возникнуть в секционных вентиляторных градирнях. Однако, башенные градирни наиболее подвержены влиянию внешних аэродинамических воздействий. Отрицательное влияние ветра сказывается на работе башенных градирен вследствие попадания холодного воздуха – ветра через верх башни. Это уменьшает тягу и ведёт к ухудшению охлаждения воды [2].

Поскольку в башенных градирнях практически невозможно управлять расходом охлаждающего воздуха, то пути оптимизации работы башенных градирен сводятся к способам регулирования расхода охлаждаемой воды.

Одним из таких способов может быть секционное распределение подачи воды [3]. Суть способа заключается в том, что при неравномерном охлаждении воды в градирне из-за аэродинамических воздействий большая часть воды, поступающей в градирню для охлаждения, подается на те секции, где охлаждение в данный момент лучше.

Таким образом, вода в градирню должна поступать через N секций, позволяющих регулиро-

вать расход воды G_i и перепад температуры ΔT_i в i -й секции ($i = 1 \dots N$). Тогда среднемассовый перепад температуры воды в градирне Φ за счет охлаждения

$$\Phi = \frac{1}{G_b} \sum_{i=1}^N \Delta T_i G_i, \quad (1)$$

где $G_b = \sum_{i=1}^N G_i$ – массовый расход воды, подаваемой в градирню.

Управление распределением воды по секциям необходимо вести таким образом, чтобы добиться максимума функционала (1) при условии

$$\sum_{i=1}^N G_i = G_b = \text{const}.$$

Тепловой коэффициент полезного действия градирни равен [3]

$$\eta = \Delta T / \Delta T_{\Pi} = F(G_b / G_a),$$

где F – безразмерная функция отношения расходов – определяется конкретными особенностями каждой градирни и может быть найдена только экспериментальным путем, G_a – массовый расход воздуха через градирню, $\Delta T_{\Pi} = T_2 - T_{\Pi}$ – предельная температура, на которую может охладиться вода.

Функцию F можно определить однозначно при помощи её аппроксимации с точностью до неизвестного коэффициента A_1 . Простейшей аппроксимацией F является *аппроксиманта Паде*

$$F = \frac{a}{1 + A_1 G_b / G_a}.$$

По расчетам [3] тепло- и массообмена в градирнях при малых расходах воды величина a из предыдущей формулы может быть принята приближенно равной 1. При этом процедура идентификации параметра A_1 по натурным измерениям устраняет возможную погрешность в определении величины a . Далее, принимая общий расхода воздуха через градирню постоянным, что справедливо для башенных градирен [3], можно записать:

$$F = \frac{1}{1 + A_1 G_b} = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\Pi}}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что

$$A_i = \frac{\Delta T_{\Pi} - \Delta T_i}{G_i \Delta T_i}, \quad i = 1 \dots N. \quad (3)$$

Используя (3), оптимальные значения секционных расходов теплой воды определяются по формулам [3]:

$$G_i^* = G_b / \left(A_i \sum_{i=1}^N A_i^{-1} \right). \quad (4)$$

Формула (4) получена с допущением, что при малых отклонениях расхода значения A_i не изменяются [3].

Другим способом оптимизации управления градирней может быть применение импульсно-периодического режима орошения [4]. Импульсно-периодический режим орошения можно организо-

вать следующим образом. Если на небольшой промежуток времени $t_1 \leq t_2$ (где t_2 – время прохождения паровоздушной смесью оросительного пространства градирни h_2) прервать поток воды из водораспределительного устройства, то в силу инерционности конвективных потоков тяга градирни сохранится, и достаточно быстро произойдет обновление паровоздушной среды в первой (зона для поступления воздуха) и во второй (зона оросительного устройства) зонах градирни. В подросительное пространство за этот промежуток времени поступит извне относительно холодный, ненасыщенный парами воды воздух.

Если затем пропустить поток воды за время t_2 , то испарительное охлаждение воды будет значительно более эффективным. Выбор времени орошения t_2 произволен, но должен определяться из условия максимальной эффективности работы градирни. Критерием оптимизации параметров импульсного режима орошения может служить параметр S , равный отношению потоков энтальпий

$$S = \frac{\Delta H_v}{\Delta H},$$

где ΔH_v – поток энтальпии в нестационарном режиме; ΔH – поток энтальпии в стационарном режиме, необходимый для обеспечения нормальной работы конденсатора турбины, которую обслуживает градирня. Этот поток можно записать как

$$\Delta H = G_b c \Delta T = \text{const},$$

где c – удельная теплоёмкость воды; G_b – массовый расход воды, протекающей через градирню (гидравлическая нагрузка); $\Delta T = T_2 - T_1$ – перепад температур воды в градирне.

Проведенные эксперименты [4] показали, что физические эффекты, связанные с переходом к периодическому режиму работы, позволят повысить тепловой КПД градирни примерно в полтора раза.

Реализация приведенных выше способов регулирования может быть выполнена с использованием системы автоматического регулирования процессом охлаждения в башенных градирнях, приведенной на рис. 2. Разработанная автоматизированная система включает в себя датчики температуры воды (T), датчики расхода воды (G), датчики температуры воздуха при $\phi = 100\%$ (T_b – температура мокрого термометра), регулирующие клапаны с электроприводами (M), микропроцессорный управляющий контроллер (K), сервер базы данных и автоматизированное рабочее место (APM) диспетчера.

Применительно к первому из изложенных выше способов регулирования общий алгоритм работы автоматизированной системы следующий. На каждом цикле регулирования значения текущих расходов и температур воды, а также температуры мокрого термометра T_b , измеряются соответствующими датчиками и передаются в управляющий контроллер (K). В контроллере производится расчет оптимальных значений расходов воды в соответствии с приведенной выше методи-

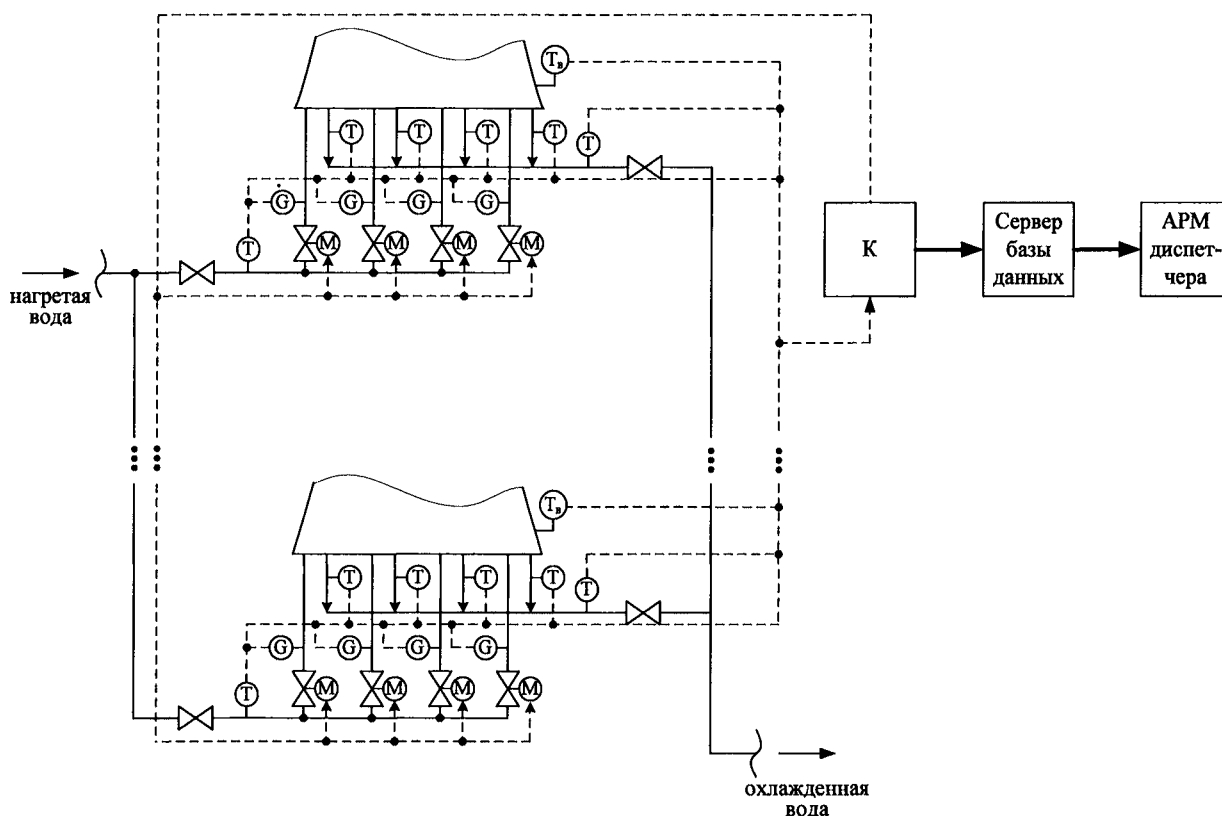


Рис. 2. Схема автоматического регулирования процессом охлаждения в башенных градирнях

кой, после чего формируются необходимые управляющие воздействия на электроприводы регулирующих клапанов (М), изменяющих расходы охлаждаемой воды через секции градирен.

Информация о текущих значениях параметров воды (температуры, расходы), положениях регулирующих клапанов и состоянии оборудования системы автоматизации передается на сервер базы данных, где происходит ее архивирование.

Просмотр текущих и архивных значений технологических параметров, а также настройка системы при наладке и в процессе эксплуатации осуществляется при помощи АРМ оператора.

Применительно ко второму из приведенных способов регулирования общий алгоритм работы системы автоматического регулирования аналогичен изложенному выше за исключением алгоритма расчета и формирования команд управления регулируемыми клапанами, реализуемого в микропроцессорном контроллере.

Заключение

1. Целью работ по автоматизации в охладительных установках является выработка закона управления, повышающего текущий КПД охлаждающей установки. При этом основными факторами, влияющими на охлаждение воды в градирне, являются разность температур охлаждаемой воды и воз-

духа, скорость движения воздуха относительно поверхности воды и относительная влажность воздуха.

2. В статье рассмотрены возможные способы оптимизации работы башенных градирен, разработана схема системы автоматического регулирования процесса охлаждения воды в башенных градирнях, позволяющая реализовать указанные способы оптимизации.

Литература

1. Стерман, Л. С. *Тепловые и атомные электростанции: учебник для вузов* / Л. С. Стерман, С. А. Тевлин, А. Т. Шарков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 456 с.
2. Акулова, Л. Г. *Аэродинамика высокопроизводительных градирен современных ТЭС* / Л. Г. Акулова, Л. Э. Родэ. – СПб.: Энергия, 1972. – 52 с.
3. Борухов, В. Т. *Оптимизация работы башенной испарительной градирни при внешних аэродинамических воздействиях* / В. Т. Борухов, С. П. Фисенко // *Инженерно-физический журнал*. – 1992. – Т. 63, № 6. – С. 678–683.
4. *Моделирование работы башенной испарительной градирни с импульсно периодическим режимом орошения* / Г. В. Дашков и др. // *Известия РАН. Энергетика*. – 2007. – № 1. – С. 96–106.

Поступила в редакцию 20 мая 2008 г.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КОМПРЕССОРНАЯ УСТАНОВКА

Д.А. Шнайдер, П.Н. Дивнич, Т.А. Барбасова

Изложены основные результаты расчета режимов струйного парового компрессора, предназначенного для повышения параметров низкопотенциального отработанного пара с целью его эффективной утилизации. Описана автоматизированная система регулирования режимов компрессорной установки.

Ключевые слова: автоматизация, компрессорная установка.

Паровой компрессор является струйным аппаратом, в котором осуществляется процесс инжекции, заключающийся в передаче кинетической энергии одного потока пара (с высокими параметрами) другому потоку пара (с низкими параметрами) путем непосредственного контакта (смешения потоков).

Повышение давления инжектируемого потока без непосредственных затрат механической энергии является основным, принципиальным качеством струйных аппаратов. Благодаря этому качеству использование струйных аппаратов во многих отраслях техники позволяет получать более простые и надежные технические решения по сравнению с применением механических нагнетателей.

Простота схем включения струйных аппаратов в различные установки наряду с исключительной простотой конструкции и несложности изготовления позволяет их использование в различных производствах, в том числе на участке энергокорпуса ПСЦ ОАО «ММК».

1. Анализ вариантов установки пароструйного компрессора для подачи пара в деаэраторы энергокорпуса

Конструктивная схема пароструйного компрессора представлена на рис. 1.

Расчет режимов работы пароструйного компрессора для подачи пара в деаэраторы энергокорпуса проведен по методике [1–3] для входных параметров рабочего пара: давление пара 6–12,5 кгс/см², расход 20–30 т/ч, температура 204 °С и входных параметров инжектируемого пара: давление пара 2–2,5 кгс/см², расход 20–30 т/ч, температура 170 °С. Результаты расчетов вариантов установки пароструйного компрессора для 8 режимов работы приведены в табл. 1.

Рабочим режимом работы пароструйного компрессора, исходя из условий эксплуатации,

выбран второй режим (см. табл. 1). Соответствующие результаты расчета геометрических параметров аппарата и параметров потока на выходе компрессора приведены на рис. 2–5.

В целях проверки практической возможности использования пароструйного компрессора для подачи низкопотенциального пара с промотборов турбин на деаэраторы энергокорпуса с давлением пара на выходе компрессора 4–4,7 кгс/см² проведен производственный эксперимент, в ходе которого давление пара, подаваемого на систему деаэрации энергокорпуса, было снижено с 6 до 4 кгс/см². Расход воды через деаэраторы во время эксперимента изменялся в зависимости от режимов работы технологического оборудования в диапазоне от 100 до 400 т/ч.

Эксперимент показал, что указанного давления достаточно для нормальной работы деаэраторов при различных режимах работы технологического оборудования, что подтверждает возможность и целесообразность внедрения пароструйного компрессора для подачи избытков низкопотенциального пара с промотборов турбин на деаэраторы энергокорпуса. Результаты проведенного эксперимента приведены в табл. 2.

Однако для поддержания выбранного рабочего режима работы пароструйного компрессора необходимо осуществлять автоматическое регулирование параметров пара. С этой целью была разработана автоматизированная система управления пароструйным компрессором.

Система автоматического регулирования режимами пароструйного компрессора включает в себя: пароструйный компрессор; регулирующий клапан с электромеханическим исполнительным механизмом У1, расположенный на подводящем паропроводе рабочего пара; датчики температуры пара ТЕ1–ТЕ3 на входах и выходе компрессора; датчики давления пара РЕ1–РЕ3 на входах и выходе компрессора; датчики расхода GE1–GE2 на трубопроводах инжектируемого и смешанного пара.

Структурная схема АСУ пароструйного компрессора представлена на рис. 6. Как видно из рис. 6 сигналы с датчиков давления, температуры и расхода пара передаются в микропроцессорный

Шнайдер Дмитрий Александрович – к.т.н., доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; shnayder@ait.susu.ac.ru.

Дивнич Петр Николаевич – аспирант кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; Divnich@mmk.ru.

Барбасова Татьяна Александровна – к.т.н., доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; barbasow@mail.ru.

Таблица 1

Результаты расчетов режимов работы пароструйного компрессора

№	Параметры режима	Давление на выходе, кгс/см ²	Диаметр камеры смешения, м	Длина камеры смешения, м	Расстояние сопла от камеры смешения, м	Длина диффузора, м	Критич. диаметр рабочего сопла, м	Выходной диаметр сопла, м
1	$P_{инж} = 2 \text{ кгс/см}^2$ $P_{раб} = 6 \text{ кгс/см}^2$ $G_{раб} = 20 \text{ т/ч}$ $G_{инж} = 20 \text{ т/ч}$	3,21	0,206	1,238	1,567	1,819	0,085	0,333
2	$P_{инж} = 2 \text{ кгс/см}^2$ $P_{раб} = 12,5 \text{ кгс/см}^2$ $G_{инж} = 20 \text{ т/ч}$ $G_{раб} = 20 \text{ т/ч}$	4,05	0,152	0,914	1,535	2,086	0,061	0,321
3	$P_{инж} = 2,5 \text{ кгс/см}^2$ $P_{раб} = 6 \text{ кгс/см}^2$ $G_{инж} = 20 \text{ т/ч}$	3,80	0,210	1,260	1,567	1,741	0,085	0,329
4	$P_{инж} = 2,5 \text{ кгс/см}^2$ $P_{раб} = 12,5 \text{ кгс/см}^2$ $G_{инж} = 20 \text{ т/ч}$ $G_{раб} = 20 \text{ т/ч}$	4,79	0,145	0,872	1,481	2,128	0,061	0,310
5	$P_{инж} = 2 \text{ кгс/см}^2$ $P_{раб} = 6 \text{ кгс/см}^2$ $G_{инж} = 30 \text{ т/ч}$ $G_{раб} = 30 \text{ т/ч}$	3,21	0,219	1,516	1,722	1,490	0,104	0,369
6	$P_{инж} = 2 \text{ кгс/см}^2$ $P_{раб} = 12,5 \text{ кгс/см}^2$ $G_{инж} = 30 \text{ т/ч}$ $G_{раб} = 30 \text{ т/ч}$	4,05	0,187	1,120	1,690	1,880	0,075	0,355
7	$P_{инж} = 2,5 \text{ кгс/см}^2$ $P_{раб} = 6 \text{ кгс/см}^2$ $G_{раб} = 30 \text{ т/ч}$ $G_{инж} = 30 \text{ т/ч}$	3,80	0,257	1,543	1,696	1,457	0,104	0,364
8	$P_{инж} = 2,5 \text{ кгс/см}^2$ $P_{раб} = 12,5 \text{ кгс/см}^2$ $G_{инж} = 30 \text{ т/ч}$ $G_{раб} = 30 \text{ т/ч}$	4,79	0,178	1,067	1,632	1,933	0,075	0,343

Таблица 2

Результаты экспериментального исследования режимов подачи пара на деаэраторы энергокорпуса

№ опыта	Время	Давление пара перед системой деаэрации, кгс/см ²	Расход пара на деаэраторы, т/ч	Температура питательной воды, °С
1	09:30	6,0	39,0	100
2	09:40	5,2	34,0	100
3	09:50	4,8	37,5	100
4	10:00	4,0	42,0	100
5	15:10	4,0	32,0	102

контроллер, который обеспечивает выполнение функций автоматического регулирования давления пара, сигнализации выхода параметров за установленные допустимые пределы, передачи текущих данных по параметрам пара и приема команд управления с рабочей станции диспетчера.

Установка пароструйного компрессора с автоматизированной системой управления, осуществляющего смешение низкопотенциального пара с промотборов турбин давлением 2,0–2,7 кгс/см² с высокопотенциальным паром давлением 12,5–16,0 кгс/см², дает возможность получить на выходе компрессора пар давлением около

4,0–4,7 кгс/см², который может быть использован для подачи на деаэраторы.

Схема включения пароструйного компрессора в технологическую схему пароснабжения представлена на рис. 7. Как видно из схемы на рис. 7 паровой компрессор включен параллельно существующей автоматической редуцирующей установке 1, настроенной на поддержание давления пара на выходе равным 4 кгс/см² (РУ 16/4). При нормальном режиме работы давление пара на выходе компрессора превышает 4 кгс/см², в результате чего РУ 1 закрыто. Расход пара с промотборов турбин идет через компрессор на деаэраторы.

Рабочий режим компрессора обеспечивается регулирующим клапаном 3 по сигналу с датчиков давления рабочего и смешанного пара (см. рис. 6). Если, в случае недостаточной подачи рабочего пара, давление на выходе компрессора становится меньше 4 кгс/см^2 , то РУ 1, автоматически открывается обеспечивая требуемое давление и расход пара на деаэраторах 4 кгс/см^2 за счет использования высокопотенциального пара (существующий режим). При этом, однако, снижается полезная подача пара на выработку электроэнергии.

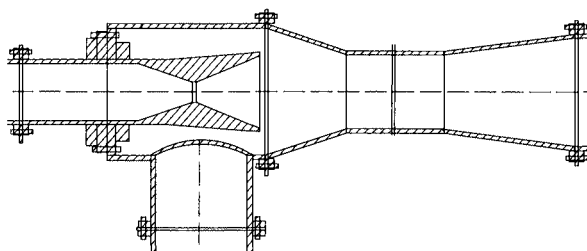


Рис. 1. Схема пароструйного компрессора:
 А – рабочее сопло;
 В – конфузор;
 С – камера смешения;
 D – диффузор

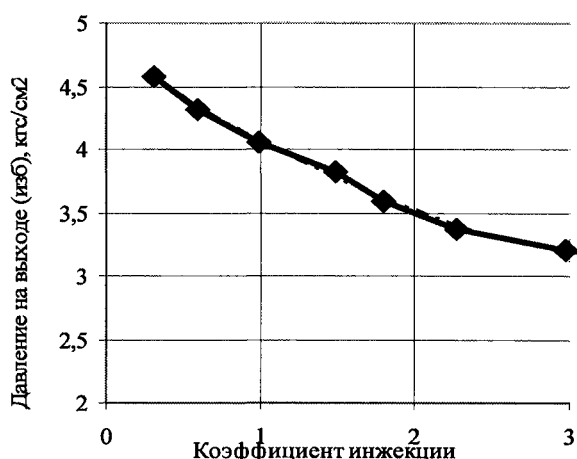


Рис. 2. Зависимость давления на выходе компрессора от коэффициента инжекции

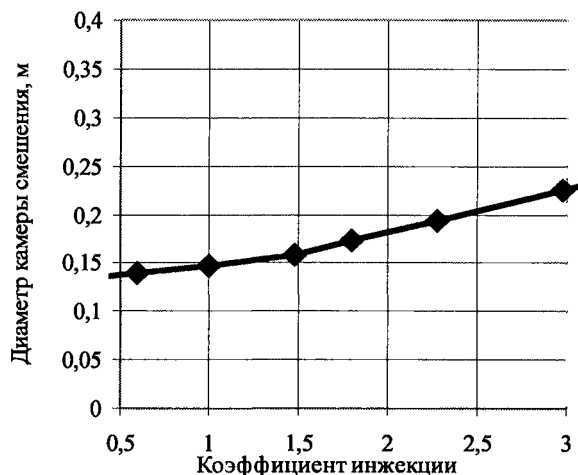


Рис. 3. Зависимость диаметра камеры смешения от коэффициента инжекции

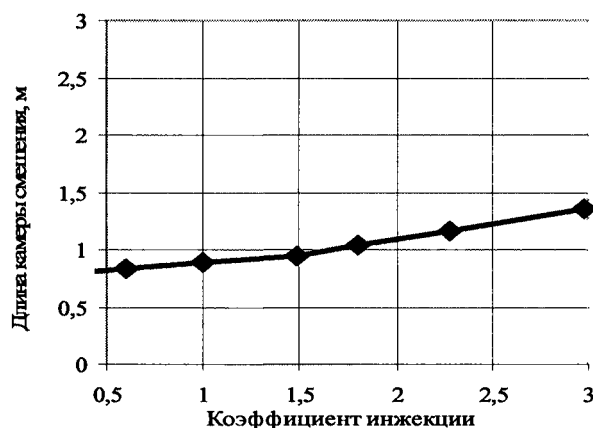


Рис. 4. Зависимость длины камеры смешения от коэффициента инжекции

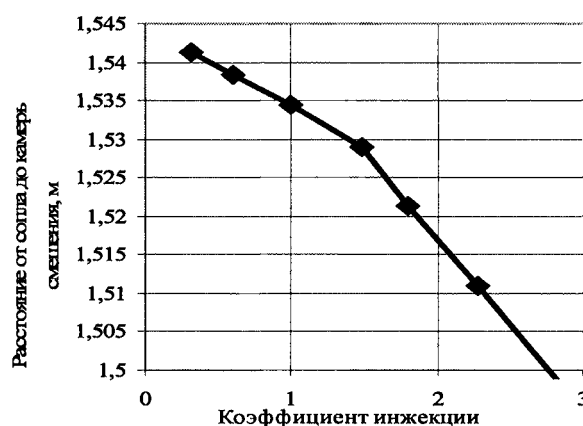


Рис. 5. Зависимость расстояния среза сопла от камеры смешения от коэффициента инжекции

Для защиты паровых турбин от повышенного давления в промотборе, связанного с изменением режимов работы парового компрессора в результате аварийных либо плановых остановов технологического оборудования энергокорпуса, предусмотрен предохранительный клапан 2.

Избыток пара с промотборов может также быть использован в сетевых бойлерах для нагрева теплофикационной воды.

Заключение

Паровой компрессор позволяет повысить давление инжектируемого потока низкопотенциального пара без непосредственных затрат механической энергии путем непосредственного смешения с паром более высоких параметров. Благодаря этому качеству паровой компрессор может быть использован для утилизации отработанного пара в различных отраслях промышленности, в том числе в металлургическом производстве.

В этой связи проведен расчет и анализ режимов работы парового компрессора, предназначенного для подачи пара в деаэраторы энергокорпуса паросилового цеха ОАО «ММК».

При этом для выявления диапазона допустимого снижения давления пара, подаваемого в систему деаэрации, был проведен производственный

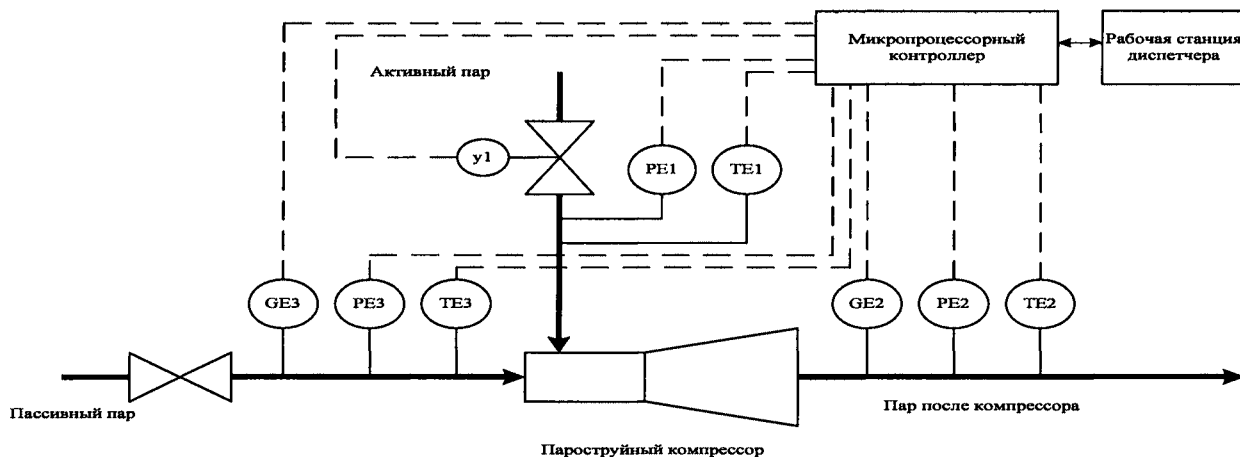


Рис. 6. Структурная схема АСУ пароструйного компрессора

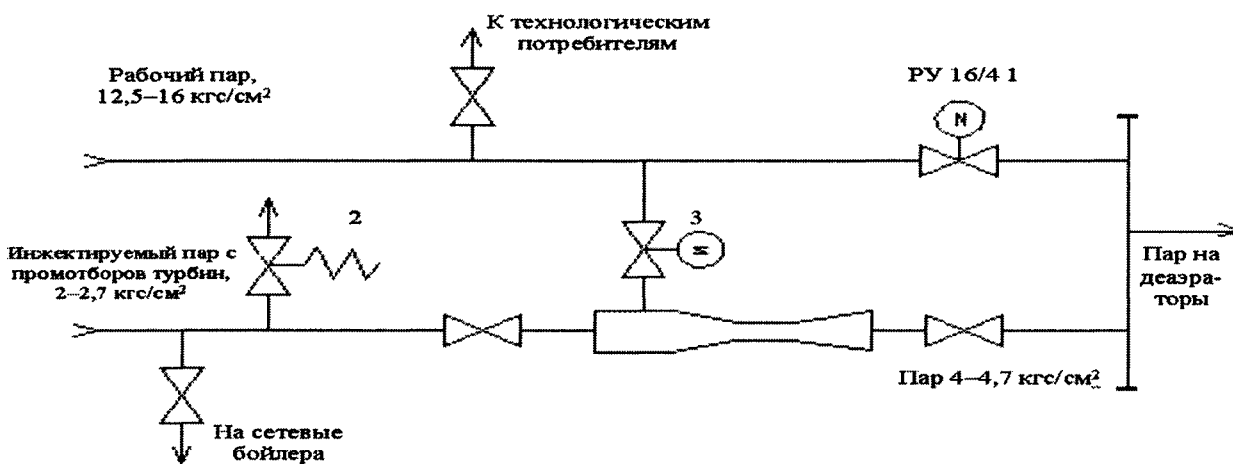


Рис. 7. Структурная схема включения пароструйного компрессора

эксперимент, который показал, что давления пара 4 кгс/см^2 достаточно для нормальной деаэрации при изменении расхода питательной воды в широком диапазоне (от 100 до 400 т/ч).

В результате получено максимальное расчетное давление пара на выходе компрессора $4,79 \text{ кгс/см}^2$ при коэффициенте инжекции $u = 1$, давлении рабочего пара $12,5 \text{ кгс/см}^2$ и инжектируемого пара $2,5 \text{ кгс/см}^2$. При снижении давления инжектируемого пара до минимального значения $2,0 \text{ кгс/см}^2$ расчетное давление на выходе компрессора составляет $4,05 \text{ кгс/см}^2$, что выше допустимого порога давления на деаэрацию, выявленного в ходе эксперимента.

Для поддержания заданного рабочего состояния пароструйного компрессора при различных режимах работы технологического оборудования энергокорпуса необходимо производить автоматизированное регулирование работы аппарата, путем изменения подачи рабочего пара. С этой целью разработана микропроцессорная системы автоматического регулирования режимов пароструйного компрессора. Регулируемым параметром является давление рабочего пара на входе компрессора. Дополнительным регулируемым параметром, накладывающим ограничения на контур регулирования давления рабочего пара, является давление пара на выходе компрессора,

поддержание которого в допустимом диапазоне необходимо по условиям технологии.

Практическое использование разработанной автоматизированной компрессорной установки позволит утилизировать низкопотенциальный пар с промотборов турбин путем его использования в системе деаэрации энергокорпуса и тем самым повысить эффективность существующей системы пароснабжения потребителей промплощадки ОАО «ММК».

Литература

1. Соколов, Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
2. Александров, А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник. Рекомендован Государственной службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98 / А. А. Александров, Б. А. Григорьев. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 168 с.
3. Зингер, Н. М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Н. М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 250 с.

Поступила в редакцию 12 мая 2008 г.

ПАСПОРТИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

В.Л. Казаринова, Д.А. Шнайдер

Рассматриваются основные принципы построения автоматизированной информационной системы (АИС) ведения энергетических паспортов промышленных потребителей. Приводится структура базы данных, основные функции интерфейса пользователя, порядок организации работы с АИС. В результате внедрения данной системы на промышленном предприятии технические эксперты получают объективную информацию об уровне и эффективности использования предприятием топливно-энергетических ресурсов.

Ключевые слова: паспортизация, топливно-энергетические ресурсы, средства автоматизации.

Энергетический паспорт топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) представляет собой документ, который характеризует состояние энергетического хозяйства предприятия. В нем отражается фактическое положение по составу энергетического и технологического оборудования, зданий и сооружений, сведения о структуре энергетических затрат на производство, показатели эффективности использования энергоресурсов, сведения об энергосберегающих мероприятиях.

Основные положения энергетической паспортизации регламентируются государственным стандартом [1].

Составлению энергетического паспорта предшествует частичный или полный аудит, который предполагает детальное обследование потребителей ресурсов.

Внедрение энергетического паспорта тесно связано с внедрением системы приборного учета и контроля энергоносителей, обеспечивающей сбор информации о фактическом потреблении ресурсов.

1. Общая структура

Для автоматизации ведения энергетических паспортов промышленных потребителей топливно-энергетических ресурсов сотрудниками кафедры «Автоматика и Управление» ЮУрГУ совместно со специалистами ЦЭСТ ОАО «ММК» была разработана автоматизированная информационная система (АИС) «Энергетический паспорт». При разработке АИС «Энергетический паспорт» использовались формы, приведенные в [1], которые были доработаны с учетом специфики ОАО «ММК».

Казаринова Вера Львовна – к.т.н., доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; kzveral@ait.susu.ac.ru.

Шнайдер Дмитрий Александрович – к.т.н., доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ; shnyder@ait.susu.ac.ru.

АИС «Энергетический паспорт» включает в себя три основных модуля:

- базу данных;
- интерфейс пользователя;
- модуль синхронизации.

Общая структура АИС «Энергетический паспорт» представлена на рис. 1.

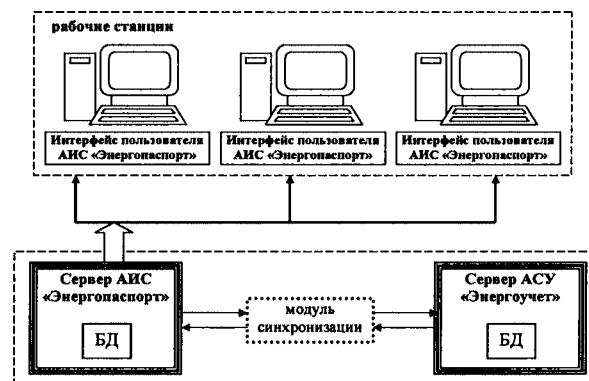


Рис. 1. Общая структура АИС «Энергетический паспорт»

Ядром АИС «Энергетический паспорт» является информационная база данных. Здесь содержатся сведения об организационной структуре предприятия, установленных узлах учета, технологическом оборудовании, потребляющем топливно-энергетические ресурсы, энергосберегающих мероприятиях, а также справочные данные по перечню и характеристикам ресурсопотребляющего оборудования.

Поддержка ведения базы данных в АИС «Энергетический паспорт» реализуется посредством системы управления базами данных (СУБД) Interbase. Указанная СУБД не требовательна к ресурсам, обеспечивая при этом высокую функциональность и надежность, в том числе защиту данных посредством резервного копирования, отката изменений и идентификации пользователей.

Модуль синхронизации осуществляет перенос данных из системы приборного учета и контроля энергоносителей АСУ «Энергоучет» в АИС «Энергетический паспорт». В частности, ежедневно обновляются сведения о логической структуре данных, на основе которых строится иерархическое дерево объектов учета в интерфейсе пользователя АИС «Энергетический паспорт».

Интерфейс пользователя реализует следующие функции:

- регистрация пользователей при запуске программы;
- ввод, редактирование, агрегирование, вывод в отчет данных о потреблении тепловой энергии, технологических газов, топливных газов, пожарно-питьевой и технической воды;
- ввод, редактирование, агрегирование, вывод в отчет данных о потреблении электрической энергии;
- ведение форм энергетического паспорта согласно [1].

Общий вид интерфейса пользователя представлен на рис. 2.

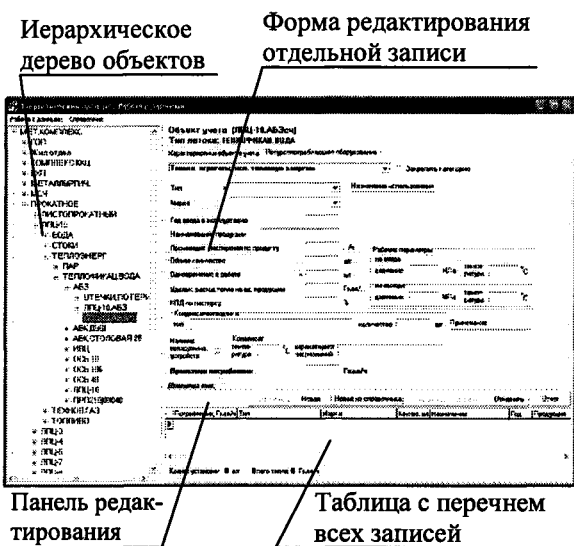


Рис. 2. Общий вид интерфейса пользователя

Интерфейс пользователя состоит из двух частей: иерархического дерева объектов и области работы с данными. В общем случае окно работы с данными состоит из трех разделов: в нижней части расположена таблица с перечнем всех записей, в верхней части – форма с полями, в которых редактируется отдельная запись, в средней части – панель с кнопками редактирования.

Общий вид структуры иерархического дерева приведен на рис. 3.

На самом нижнем уровне иерархии находятся объекты учета, которые могут представлять собой потребление ресурса группой зданий или частью одного здания, группой оборудования или одной единицей оборудования. Перечень объектов учета

формируется на основе сведений из АСУ «Энергоучет» ОАО «ММК».

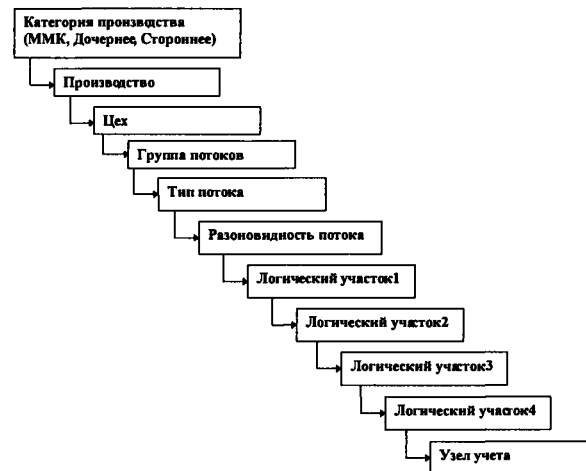


Рис. 3. Структура иерархического дерева

На объектах учета в интерфейсе пользователя АИС «Энергетический паспорт» осуществляется ввод информации о проектном потреблении тепловой энергии, топливных газов, продуктов разделения воздуха, пожарно-питьевой и технической воды. Величина проектной нагрузки может быть задана двумя способами:

- пользователь вводит общую величину проектной нагрузки на объект учета;
- пользователь вводит сведения о проектной нагрузке на оборудование, подключенное к объекту учета, после чего программа агрегирует проектные нагрузки оборудования и рассчитывает нагрузку на объект учета.

Достоверную оценку необходимого уровня нагрузки объекта можно сделать на основе детального энергетического обследования ресурсопотребляющего оборудования. Однако, такие обследования являются трудоемким мероприятием. Из-за ограниченности ресурсов, выделяемых для проведения работ по паспортизации, детальные обследования могут быть рекомендованы в следующих случаях:

- решения локальных задач оценки потребления энергоресурсов на уровне конкретных потребителей;
- проведения выборочных обследований.

В случае принятия решения о проведении детального энергетического обследования ресурсопотребляющего оборудования объекта, АИС «Энергетический паспорт» предусматривает хранение и обработку данных для следующих категорий оборудования, представленных на рис. 4.

На основе данных о паспортных характеристиках оборудования осуществляется расчет проектной нагрузки. Перечень реализованных расчетов включает в себя:

- теплотехнические расчеты нагрузок отопительных приборов, калориферных установок,

трубопроводов внутри здания, отопительных агрегатов, водоподогревающего оборудования;

- расчет потребления воды санитарными приборами.

При расчете используются справочные характеристики оборудования, в зависимости от типа, марки установленного прибора. В теплотехнических расчетах используются параметры теплоносителя.



Рис. 4. Категории оборудования объектов учета

Для технологических агрегатов, использующих топливо, технологические газы, воду, проектная нагрузка может определяться одним из двух способов:

- суммированием нагрузок оборудования, входящего в состав данного агрегата.
- величина проектной нагрузки на агрегат принимается равной паспортной величине.

В состав агрегата может входить оборудование разного типа и марок. Часть данного оборудования на момент обследования может быть выведено из работы. В этом случае использование паспортной нагрузки агрегата некорректно и необходимо осуществлять расчет по работающему оборудованию, установленному на агрегате.

Для учета электрической энергии на ОАО «ММК» в настоящий момент создается отдельная АСУ, поэтому в АИС «Энергетический паспорт» нет объектов учета электроэнергии. Ввод и редактирование информации о потреблении электрической энергии осуществляется в АИС «Энергетический паспорт» в целом для цеха.

Согласно [1] на уровне цеха в программе реализовано ведение соответствующих форм, включающих в себя следующие данные:

- общие сведения о потребителе ТЭР;
- сведения о потреблении электроэнергии, тепловой энергии, котельно-печного и моторного топлива;

- сведения о показателях эффективности использования ТЭР;
- сведения об энергосберегающих мероприятиях.

Заключение

Разработанная АИС «Энергетический паспорт» позволяет автоматизировать ввод, хранение и редактирование энергетических паспортов промышленных потребителей топливно-энергетических ресурсов.

В АИС «Энергетический паспорт» реализовано ведение проектных нагрузок объектов учета для тепловой энергии, технологических газов, топливных газов, пожарно-питьевой и технической воды. Для каждого объекта учета сведения о нагрузке могут быть детализованы на уровне агрегатов и технологического оборудования. Информация по объектам учета интегрирована с системой приборного учета и контроля энергоносителей АСУ «Энергоучет» ОАО «ММК», обеспечивающей сбор информации о фактическом потреблении ресурсов.

Реализованный на уровне цеха интерфейс ввода данных о потреблении электрической энергии позволяет вести учет установленного в цехе электрооборудования, при этом возможно агрегирование суммарной мощности установок, а также ведение перечня отключаемого и неэффективно работающего оборудования. Кроме того, в АИС «Энергетический паспорт» реализован учет характеристик цеховых трансформаторов и параметров синхронных двигателей.

На уровне цеха разработан интерфейс ведения форм энергетического паспорта согласно [1], что позволяет автоматизировать редактирование, агрегирование и вывод в отчет показателей использования топливно-энергетических ресурсов объектами производственного и общехозяйственного назначения ОАО «ММК».

В целом, использование АИС «Энергетический паспорт» позволяет оценить эффективность расхода ресурсов на основе сопоставления фактических и проектных нагрузок объектов учета. Информация о проектных нагрузках сторонних и дочерних предприятий предоставляет базовую информацию для заключения договоров на пользование энергетическими ресурсами.

Литература

1. ГОСТ 51379-99. Энергетический паспорт промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 11 с.

Поступила в редакцию 6 мая 2008 г.

ЛИНГВИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВЕЛЬЦ-ПРОЦЕССОМ

А.Р. Вернергольд, Л.С. Казаринов, О.В. Колесникова

Рассматриваются основные положения процесса вельцевания цинковых кеков, методика оптимизации вельц-процесса на основе лингвистических правил, алгоритм выделения области Парето оптимальных режимов в информационной базе данных АСУ ТП.

Ключевые слова: вельц-процесс, процесс вельцевания, оптимизация управления, оптимизация вельц-процесса, нечеткая логика.

Производство цинка – одно из основных направлений цветной металлургии страны. В 90-х годах резко увеличилась конкуренция на рынке цинка. Для сохранения своих позиций перед заводами возникла проблема увеличения производства цинка с улучшением его качества и уменьшением затрат на производство. Это определило необходимость реконструкции заводов с ориентацией на внедрение современных информационных технологий.

Крупнейшим в РФ производителем цинка, кадмия, индия является ОАО «Челябинский цинковый завод». ОАО «ЧЦЗ» как и большинство заводов по производству цинка работает по классической гидрометаллургической схеме: обжиг цинковых концентратов, выщелачивание огарка с очисткой растворов и электролитическое осаждение цинка с последующим перешлавом катодов.

Первой стадией указанной схемы производства цинка является обжиг цинковых концентратов и некондиционных вторичных видов сырья (коллективные концентраты, окисленная руда, кеки, шламы и др.). Самой эффективной технологией утилизации цинкосодержащего вторичного сырья является вельц-процесс.

Вельц-процесс применяется для переработки материалов с низким содержанием летучих металлов путем нагревания их во вращающейся трубчатой печи до температуры, при которой извлекаемый металл возгоняется. Возогнаный металл увлекается газами, образующимися в печи, и улавливается в виде пыли, обогащенной возогнанным металлом.

На качество процесса вельцевания сильно влияют нестабильность основных параметров, отсутствие автоматизированного контроля и управления локальными и сквозными параметрами, не-

определенность параметров рабочего режима, обеспечивающих высокий выход вельц-оксида. Все это снижает качество процесса вельцевания.

Актуальной задачей повышения эффективности процесса вельцевания является автоматизация управления в рамках АСУ ТП. Задачи данного класса рассматривались в литературе, главным образом для цементного производства [1–4]. Вопросы управления процессом вельцевания цинковых кеков с точки зрения эффективности производства освещены в работах [5, 6]. Однако задача использования современных методов обработки информации в АСУ ТП с целью оптимизации процесса вельцевания изучена недостаточно.

1. Постановка задачи

Процесс вельцевания цинковых кеков производится во вращающихся печах. Общая структура процесса представлена на рис. 1.

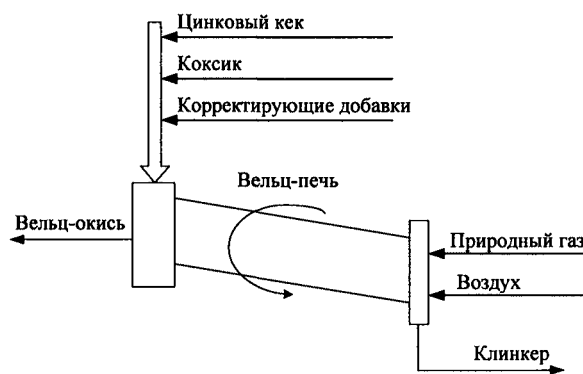


Рис. 1. Структура вельц-процесса

Цинковый кек содержит около 20 % цинка, индий, кадмий, свинец, медь. Для извлечения этих металлов его смешивают с коксовой мелочью и нагревают до 1250–1350 °С в вельц-печи. Тепло выделяется за счёт сгорания коксовой мелочи и экзотермических реакций. В качестве флюсоующих добавок, позволяющих оптимизировать вельц-процесс при переработке цинковых кеков, используются известняк и формовочный песок. Технологический воздух используется для интенсификации процессов горения углерода и окисления паров цинка, свинца и кадмия, поддержания необходимой

Вернергольд Александр Рудольфович – начальник цеха КИП, главный метролог ОАО «Челябинский цинковый завод»; arv@zinc.ru.

Казаринов Лев Сергеевич – д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ, заведующий кафедрой автоматики и управления ЮУрГУ; kazarinov@ait.susu.ac.ru.

Колесникова Ольга Валерьевна – к.т.н., доцент кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; porova_ov@ait.susu.ac.ru.

температуры в реакционной зоне. Принудительная подача воздуха используется также для эффективного сжигания природного газа при разогреве печи. Природный газ используется для сушки и разогрева футеровки печи при ее пуске, а также для разогрева материала после остановок печи и технологических нарушений. Оптимальным является ведение процесса без использования природного газа. Продуктами вельцевания являются вельц-окись, которая возгоняется, охлаждается и улавливается рукавными фильтрами, и медистый клинкер. В вельц-окиси содержится около 75 % оксида цинка, оксиды кадмия, индия и свинца. Медистый клинкер содержит 3–4 % меди и 30–35 % железа. Вельц-окись направляется на выщелачивание, а клинкер отгружается на медные предприятия.

В соответствии с работой [5], в качестве критериев оптимизации вельц-процесса можно принять следующие:

- максимальное содержание оксида цинка в пыли, которую выносят из печи протекающие газы $\max M_{ZnO}$; (1)

- максимальное повышение CO_2 в отходящих газах $\max V_{CO_2}$; (2)

- минимальный объем дутья (воздуха) при удовлетворении допусков на режимные параметры вельц-процесса $\min V_{O_2}$. (3)

Смысл этих критериев достаточно очевиден: критерий (1) отражает выход целевого продукта вельц-печи; максимальное содержание CO_2 в отходящих газах (критерий (2)) обеспечивает полное выгорание в печи составляющей углерода, являющейся основным источником тепла вельц-процесса; минимизация расхода кислорода V_{O_2} (критерий (3)) соответствует минимальной подаче воздуха в печь. Здесь, если подается избыток воздуха, то тепло выдувается из печи и снижается ее энергетическая эффективность. При недостатке воздуха наблюдается неполное выгорание соответствующей составляющей углерода и невыработка тепловой энергии, что также снижает эффективность печи.

В процессе эксплуатации печи наблюдаются различные режимы ее работы, которые зависят от параметров загрузки печи и параметров ведения вельц-процесса. Каждому режиму ведения вельц-процесса соответствует свой набор результирующих показателей:

$$\{(M_{ZnO}, V_{CO_2}, V_{O_2})_s : s = 1, 2, \dots, N\}, \quad (4)$$

где $(M_{ZnO}, V_{CO_2}, V_{O_2})$ – вектор наблюдаемых базовых показателей эффективности режимов; s – индекс наблюдаемых режимов печи; N – количество режимов.

В общем случае ведение вельц-процесса не является оптимальным. Формально это означает, что для некоторого s -го режима, характеризующегося наблюдаемыми значениями показателей эф-

фективности $(M_{ZnO}, V_{CO_2}, V_{O_2})$, можно указать резервы повышения показателей эффективности: повышение M_{ZnO} , V_{CO_2} и снижение V_{O_2} . Для оптимальных режимов невозможно осуществить улучшение одного из показателей без ухудшения других показателей. Как известно из теории оптимизации, совокупность неуплощаемых решений образуют область Парето в задачах оптимизации. Представляется целесообразным из множества всех наблюдаемых режимов ведения вельц-процесса выделить Парето-оптимальные режимы. Зная набор Парето-оптимальных режимов, можно рассчитать для них тепловой и материальный балансы, которые, в свою очередь, могут служить основой для оптимального ведения вельц-процесса.

В данной работе приводится алгоритм выделения Парето-оптимальных режимов в рамках ведения информационной базы данных АСУ ТП.

2. Алгоритм выделения области Парето-оптимальных режимов в информационной базе данных

Будем теоретически представлять уравнение области Парето соотношением:

$$y = f[a](x), \quad (5)$$

где y – объем воздушного дутья; x – вектор технологических факторов, в данном случае, состоящий из двух факторов: M_{ZnO} и V_{CO_2} ; a – вектор структурных параметров зависимости (5).

Отклонение данных эксплуатации от теоретического значения, определяемого областью Парето, определим соотношением

$$e_s = y_s - f[a](x_s), \quad s = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

s – индекс статистического наблюдения.

Для того чтобы выделить область Парето, на отклонение от указанной области введем штрафную функцию (рис. 2).

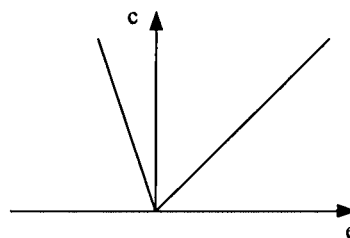


Рис. 2. Штрафная функция

Суммарный штраф при отклонении данных эксплуатации от области Парето:

$$C = \sum_s S_{ш}^2 |e_s^-|^2 + \sum_s |e_s^+|^2, \quad (7)$$

где e_s^- , e_s^+ – отрицательные и положительные значения отклонений экспериментальных данных от области Парето; $S_{ш}$ – величина штрафа при наличии отклонения экспериментального значения

показателя y_s ниже теоретического значения, определяемого областью Парето $f[\mathbf{a}](x_s)$.

Ставится задача найти аналитическое выражение области Парето по критерию минимума суммарного штрафа (7) на данных эксплуатации.

Сначала предположим, что выражение отклонения (6) можно представить в виде линейной функции:

$$e_s = y_s - \sum_{j=0}^n a_j x_{js}, \quad n = 1, 2. \quad (8)$$

Условия минимума суммарного штрафа:

$$\frac{\partial C}{\partial a_i} = -2S_{\text{ш}}^2 \sum_s 1\left(\left|e_s^-\right|\right) \left(y_s - \sum_{j=0}^n a_j x_{js}\right) x_{is} - \\ -2 \sum_s 1\left(\left|e_s^+\right|\right) \left(y_s - \sum_{j=0}^n a_j x_{js}\right) x_{is} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (9)$$

где $1\left(\left|e_s^-\right|\right)$, $1\left(\left|e_s^+\right|\right)$ – единичные функции.

Решение линейного алгебраического уравнения:

$$\sum_{j=0}^n g_{ij} a_j = d_i, \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad (10)$$

$$g_{ij} = S_{\text{ш}}^2 \sum_s 1\left(\left|e_s^-\right|\right) x_{is} x_{js} + \sum_s 1\left(\left|e_s^+\right|\right) x_{is} x_{js};$$

$$d_i = S_{\text{ш}}^2 \sum_s 1\left(\left|e_s^-\right|\right) y_s x_{is} + \sum_s 1\left(\left|e_s^+\right|\right) y_s x_{is}.$$

Решение задачи (10) осуществляется итерационно на основе последовательных решений соответствующей системы линейных алгебраических уравнений (10), определяющих минимизацию целевой функции (7) методом наискорейшего спуска.

В случае нелинейной функции $f[\mathbf{a}](x_s)$ задача решается методом Ньютона. В этом случае постановка задачи (6), (7) линеаризуется в виде (8) и решение ведется итерационно с использованием решений системы уравнений (10).

В результате будет получено аналитическое выражение области Парето (5), с помощью которого можно характеризовать режимы работы печи как оптимальные или неоптимальные.

3. Нечеткие зависимости (лингвистические правила) в управлении процессом вельцевания

Оперативное управление процессом вельцевания целесообразно осуществлять на основе нечетких зависимостей (лингвистических правил), которые более адекватно отражают реальные процессы управления печью человеком–оператором. Преимущество использования лингвистических правил состоит в том, что они позволяют:

- учесть качественные суждения и качественный опыт управления печами;
- создавать правила для нечетких ситуаций управления печью, когда не известны причины

отклонений параметров режимов от номинальных значений;

- органично вписываются в формат инструкций оператора печи по рациональному ведению режимов.

Нечеткие правила необходимо формулировать для приведения текущих режимов печи к Парето-оптимальным режимам, методика выделения которых приведена выше. Другими словами, нечеткие правила должны представлять собой инструкции оператору как при наличии отклонений режимных параметров привести их к Парето-оптимальным значениям.

В рамках указанного подхода состояние печи представляется лингвистическими переменными, а задача оперативного управления структурируется на основе следующих категорий: «Отклонение», «Причина», «Действие», «Результат», «Оценка». Под отклонением понимается отклонение режимных параметров печи от расчетных значений. Эти отклонения выражаются:

- в случае количественной оценки – числом;
- в случае качественной оценки отклонения определяются: «много ниже нормы», «ниже нормы», «несколько ниже нормы», «норма», «несколько выше нормы», «выше нормы», «много выше нормы».

По категории «Причина» указываются причины возникших отклонений. Под действием понимается корректирующие действия, выполняемые оператором для того, чтобы привести текущий режим к расчетному режиму. Действия измеряются по качественной шкале – шкале интенсивности: «значительно добавить», «добавить», «слегка добавить», «расчетное действие», «слегка убавить», «убавить», «значительно убавить». Результат выражается количественными оценками для базовых параметров: M_{ZnO} , V_{CO_2} , V_{O_2} . Для категории «Оценка» вводится шкала оценок со следующими градациями: «оптимально», «субоптимально», «допустимо», «недопустимо».

В указанных шкалах создается реляционная база данных по ведению технологического процесса печи, форма заполнения которой приведена в табл. 1. В результате формируется статистика ведения режимов печи. На основе статистической обработки выявляются правила оптимального управления процессом вельцевания.

Предложенный подход позволяет улучшить процесс вельцевания за счет приведенных выше градаций. Так, например, содержание цинка и свинца в клинкере может превышать установленную норму. Причиной этого отклонения может являться повышенная загрузка печи или недостаточная подача вторичного воздуха.

В типовой технологической инструкции говорится, что в случае повышенной загрузки печи необходимо снизить загрузку, в случае недостаточной подачи вторичного воздуха увеличить его подачу. Применение нечеткой логики позволяет формулировать действия для улучшения процесса

в терминах, более понятных человеку–оператору, например, слегка убавить загрузку печи, значительно убавить загрузку печи или слегка добавить подачу вторичного воздуха, значительно добавить подачу вторичного воздуха.

В технологической инструкции по переработке цинковых кеков вельцеванием в условиях ком-

плекса вельц-печи № 5 ОАО «ЧЦЗ» имеются данные по отклонениям, носящим технологический характер, а также указаны причины отклонений и меры по нормализации процесса. Фрагмент указанных данных приведен в табл. 2. Однако, как можно видеть из табл. 2, в технологической инструкции отклонения и действия по устранению от-

Таблица 1

Форма заполнения реляционной базы данных по ведению технологического процесса печи

Отклонение	Причина	Действие	Результат			Оценка
			M_{ZnO}	V_{CO_2}	V_{O_2}	
...

Таблица 2

Фрагмент технологической инструкции по переработке цинковых кеков вельцеванием в условиях комплекса вельц-печи № 5 ОАО «ЧЦЗ»

Отклонение	Причина отклонения	Меры по нормализации процесса
<i>Приготовление шихты в барабане-грануляторе</i>		
Шихта пылит	<ul style="list-style-type: none"> Шихта включает избыточное количество пылевидных материалов и кокса сорта «Б». Отсутствует подача цинкового кека 	<ul style="list-style-type: none"> Проверить загрузку транспортера № 0–5 шихтовыми материалами из питателей № 1–3. Обеспечить подачу кека, отрегулировать подачу сухих компонентов шихты
	<ul style="list-style-type: none"> Недостаточное содержание влаги в шихте 	<ul style="list-style-type: none"> Увлажнить шихту подачей пульпы шлама очистных сооружений из бака № 0–26 насосом № 0–27. Отрегулировать подачу пульпы в барабан
Шихта вязкая, выгружается из барабана большими комьями	<ul style="list-style-type: none"> Недостаточная подача сухих компонентов в шихту 	<ul style="list-style-type: none"> Проверить загрузку транспортера № 0–5 сухими материалами (кокс сорта «Б», флюс), отрегулировать при необходимости
	<ul style="list-style-type: none"> Избыточное увлажнение шихты 	<ul style="list-style-type: none"> Снизить расход пульпы в барабан-гранулятор вплоть до отключения насоса № 0–27
Недостаточное перемешивание шихты	<ul style="list-style-type: none"> Перегрузка барабана-гранулятора 	<ul style="list-style-type: none"> Снизить суммарную загрузку транспортера № 0–5 из питателей (сохраняя заданные соотношения)
<i>Вельцевание</i>		
Повышенная температура в верхней головке печи (более 800–850 °С)	<ul style="list-style-type: none"> Увеличенная тяга печи, перегрев материала 	<ul style="list-style-type: none"> Уменьшить тягу печи. Прекратить подогрев печи газовой горелкой, уменьшить принудительную подачу воздуха в печь
	<ul style="list-style-type: none"> Недостаточная загрузка шихты в печь 	<ul style="list-style-type: none"> Увеличить загрузку шихты
Образование железистых криц (шаров) в печи	<ul style="list-style-type: none"> Высокое содержание железа в шихте при недостатке кремнезема. Избыток коксовой мелочи в шихте. Перегрев материала в печи. Сокращение операции «сварачивания ванны» в печи 	<ul style="list-style-type: none"> Сократить расход коксовой мелочи. Скорректировать состав шихты для следующей загрузки. Операцию «сварачивания ванны» вести, не допуская перегрева материала. Остановить печь и извлечь образовавшиеся крицы. Не допускать увеличения размеров криц в печи до критических, затрудняющих их выгрузку
Образование металлизированной настывли около разгрузочного конуса печи	<ul style="list-style-type: none"> Высокое содержание железа в шихте при недостатке кремнезема. Избыток коксовой мелочи в шихте 	<ul style="list-style-type: none"> Скорректировать состав шихты. Не допускать перегрева материала. Образовавшуюся настывль выплавить, увеличив содержание кремнезема (песка) в шихте или выжечь, подавая на нее кислород

клонений не имеют градаций, отсутствует категория «Результат», а также не производится оценка режима процесса вельцевания после принятия мер по устранению отклонений параметров вельц-печи от расчетных значений.

Выводы

1. При автоматизации управления процессами вельцевания цинковых кеков наряду с задачами контроля и стабилизации режимных параметров целесообразно решать задачу оптимизации режимов процессов вельцевания.

2. Решение задачи оптимального управления вельц-процессом осуществляется на основе выявления области Парето в пространстве основных показателей эффективности указанного процесса.

3. В работе предложен алгоритм выделения области Парето оптимальных режимов в информационной базе данных АСУ ТП.

4. Применение предложенного алгоритма выделения области Парето позволяет организовать оптимальное управление технологическим процессом в печи, обеспечивающее повышение его эффективности.

5. В работе предлагается оперативное управление процессом вельцевания осуществлять на основе нечетких зависимостей (лингвистических правил), которые должны представлять собой

6. инструкции оператору как при наличии отклонений режимных параметров привести их к Парето-оптимальным значениям.

Литература

1. Лисиенко, В. Г. *Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справочное издание: в 2 кн.* / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгин. – М.: Теплотехник, 2004. – 588 с.

2. Krings, L. *LINKman in cement production: optimization beyond traditional control* / L. Krings, D. W. Haspel // *ABB Review*. – 1995. – № 7. – С. 32–38.

3. Stadler, K. S. *Model predictive control of the calciner at Holcim's Lagerdorf plant with the ABB Expert Optimizer* / K. S. Stadler, B. Wolf, E. Gallestey // *ZKG International*. – 2007. – № 3.

4. Галлестей, Э. *Новые подходы к работе в цементной промышленности* / Э. Галлестей, Д. Кастаньоли, К. Колберт // *ABB Review*. – 2004. – № 2. – С. 13–19.

5. Козлов, П. А. *Вельц-процесс* / П. А. Козлов. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2002. – 176 с.

6. Абдеев, М. А. *Вельцевание цинк-свинцоводержащих материалов* / М. А. Абдеев, А. В. Колесников, Н. Н. Ушаков. – М.: Металлургия, 1985. – 120 с.

Поступила в редакцию 19 мая 2008 г.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОВ

А.И. Вуколова, А.В. Николаенко

Рассматривается методика расчета фактической температуры и остаточной долговечности металла, позволяющая определять наиболее теплонапряженные зоны, узлы и элементы с максимальными температурами металла, выявлять причины появления и развития дефектов, производить оценку долговечности, планировать частичную или полную замену металла для рационального проведения ремонтно-профилактических работ.

Ключевые слова: температура металла, неразрушающий контроль, оперативный контроль, поверхности нагрева.

Переход к системе обслуживания и ремонта оборудования ТЭС и ТЭЦ по техническому состоянию создает предпосылки для широкого внедрения в энергетике систем обслуживания, контроля, технического диагностирования и мониторинга.

Современное развитие средств измерительной техники, а также высокий уровень программно-технических комплексов АСУТП электростанций открывают новые пути в создании и организации вышеуказанных систем для обеспечения надежности и эффективности эксплуатации поверхностей нагрева.

Состояние металла поверхностей нагрева, камер, коллекторов, перепускных труб определяет надежность работы котла.

Наиболее повреждаемыми в тракте котлов являются пароперегревательные и испарительные поверхности нагрева, на температурный режим которых влияют условия эксплуатации.

Основными источниками информации о температурных режимах являются измерения температуры металла в обогреваемой зоне, температуры среды на выходе из наиболее теплонапряженных змеевиков, средних температур за каждой ступенью пароводяного тракта котла. Измеренная с помощью температурных вставок температура является фактической температурой металла, поскольку учитывает все эксплуатационные факторы, влияющие на нее, и предоставляет самую надежную информацию, от которой зависят прочностные и физические свойства металла, определяющие уровень накопленной поврежденности и в итоге – долговечность труб. Очень важно при этом установить вставки в зоне наиболее теплонапряженных и обогреваемых участков труб. Несвоевременная и недостаточная информация о темпе-

ратурном режиме может стать причиной повреждения труб.

Однако не всегда есть возможность установить дорогостоящие температурные вставки и дополнительные термомпары для определения фактической температуры металла.

В УралВТИ по результатам обобщения экспериментальных и аналитических исследований температурного режима поверхностей нагрева котлов энергоблоков 150–800 МВт разработаны методики расчета фактической температуры и остаточной долговечности металла.

Использование этих методик позволяет:

- определять наиболее теплонапряженные зоны, узлы и элементы с максимальными температурами металла;
- осуществлять контроль за ними (вырезкой образцов);
- выявлять причины появления и развития дефектов;
- производить оценку долговечности;
- планировать частичную или полную замену.

За основу в методике расчета фактической температуры металла труб поверхностей нагрева принята формула [1]:

$$t_M = t_{II}' + \rho_q (t_{II}' - t_{II}'') + \Delta t_{МП}, \quad (1)$$

где t_M – температура металла на входе в пароперегреватель; t_{II}' – температура пара на входе в пароперегреватель; t_{II}'' – температура пара на выходе из пароперегревателя; $\Delta t_{МП} = t_M - t_{II}''$ – разность температур металла (t_M) и пара (t_{II}'') в точке замера или расчета; $\rho_q = \eta_t \eta_k / \rho_r$ – тепловая развертка пароперегревателя, характеризующая неравномерность тепловосприятия отдельных змеевиков; $\eta_t = \eta_{ш} \eta_{гд}$ – тепловая неравномерность со стороны газов по ширине ($\eta_{ш}$) и глубине ($\eta_{гд}$) газохода; $\eta_k = H_x / H_{cp}$ – конструктивная нетождественность, определяемая разной длиной труб в обогре-

Вуколова Алина Ивановна – к.т.н., ведущий научный сотрудник филиала «УралВТИ-Челябэнергосетьпроект» ОАО «Инженерный центр энергетики Урала»; vai@chel.iceu.ru.

Николаенко Алексей Васильевич – аспирант кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; nikolaenko@chel.iceu.ru.

ваемой зоне, где H_x – площадь отдельного змеевика, а H_{cp} – средняя площадь змеевика; $\rho_r = G_x/G_{cp}$ – гидравлическая разверка определяемая как отношение расхода в данной трубе (G_x) к среднему расходу (G_{cp}) по трубам пароперегревателя.

Для определения местоположения змеевика с максимальной температурой пара и металла производится расчет для каждого элемента величины тепловой разверки (ρ_q) и ее составляющих (η_r и ρ_r) по ширине и глубине газохода котла и строятся графики распределения этих величин.

Наибольшую сложность в таких расчетах представляет расчет тепловой неравномерности по ширине всего газохода котла (η_r), определяемой по [2].

Для каждой ступени ширм по расчетным данным находятся максимальное, минимальное и среднее значения тепловой неравномерности, затем рассчитывается относительная величина для каждого элемента ступени:

$$\eta_{отн.х} = \frac{\eta_{т.х}}{\eta_{т.ср}}, \quad (2)$$

где $\eta_{т.х}$ – тепловая неравномерность отдельной ступени ширм; $\eta_{т.ср}$ – средняя тепловая неравномерность ступени ширм.

Расчет гидравлической разверки выполняется по [3], где представлены алгоритмы расчетов более 20 коллекторных схем.

Результаты расчета и графическое представление η_r , ρ_r и ρ_q позволяют определять зоны с максимальными и минимальными значениями этих параметров, а также взаимное их влияние на температуру металла.

Так для случая, когда минимальные расходы имеют крайние ширмы, а максимальные – ближе к центру газохода, то по характеру распределения тепловая неравномерность и гидравлическая разверка совпадают, что приводит к уменьшению тепловой разверки и, как следствие, к снижению температуры металла. В этом случае имеет место компенсация расходами пара тепловой неравномерности со стороны газов. Совпадение по месту

максимальных ρ_q и η_r дает основание считать эти трубы наиболее тепло-напряженными, т.е. с максимальной температурой пара и стенки. Во всех многозаходных змеевиках поверхностей нагрева такими являются внешние, самые длинные и обогреваемые змеевики.

В средних ширмах расчетная тепловая неравномерность и гидравлическая разверка взаимно распределены так, что в результате их взаимодействия тепловая разверка становится выше тепловой неравномерности, так как в месте максимума η_r расположены ширмы с минимальными расходами и наоборот. Такое взаимодействие предполагает наличие самых теплонапряженных ширм в центре газохода и соответственно их внешних змеевиков.

Заключение

Практическое применение методики расчета фактической температуры металла стенки труб и определение местоположения наиболее теплонапряженных элементов и участков труб позволят выявить очаги зарождения поврежденности. Данная методика будет апробирована для оценки технического состояния металла труб и их долговечности на котле стана № 6 ЦЭС ММК. Для этого в пароперегревателе будут установлены и подключены к АСУТП термодатчики для организации автоматизированного контроля и мониторинга за температурным режимом наиболее теплонапряженных труб и последующего расчета остаточной долговечности металла [4].

Литература

1. *Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод.* – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998.
2. Чебулаев, В. В. *О выборе тепловых неравномерностей на выходе из топки при проектировании пароперегревателей современных котлов* / В. В. Чебулаев // *Теплоэнергетика.* – 1989. – № 8. – С. 25–28.
3. *Расчет гидравлических и тепловых разверок в пароперегревателях. Руководящие указания.* – Л., 1990. – № 58.
4. *Разработка модели технического состояния поверхностей нагрева с учетом эксплуатационных факторов: отчет* / УралВТИ; А. И. Вуколова, В. А. Нахалов. – Челябинск, 2000.

Поступила в редакцию 21 мая 2008 г.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕСТОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

О.В. Стрелкова, А.Л. Шестаков

Рассматривается применение тестовых воздействий для оценки состояния термометра сопротивления. Предложенный алгоритм позволяет оценивать изменение характеристик термометра сопротивления (ТС) в режиме реального времени, существенно уменьшить погрешность измерений, обусловленную изменением метрологических характеристик СИ в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: термопреобразователи сопротивления, тестовые воздействия, характеристики термометров.

Повышение стандартов безопасности технологических процессов, увеличение эффективности производства требует осуществление контроля изменения характеристик датчика в режиме реального времени. Непрерывная оценка состояния СИ дает возможность своевременно обнаружить неисправность, устранить ошибки в сигнале измерения, обеспечить ведение технологических процессов в оптимальных режимах.

Разработаны методы обнаружения неисправностей СИ: использование информационной избыточности [1], применение нейронной сети [2], анализ выходного сигнала датчика (его частотных и временных характеристик) [1]. Методы информационной избыточности и использования нейронной сети требуют совокупности выходных данных нескольких преобразователей (для нормального функционирования сети количество входных сигналов должно быть не менее 15 [2]). Использование метода информационной избыточности становится затруднительным при отсутствии доступной и качественной модели технологического процесса. Недостатком анализа выходного сигнала является ограниченность количества полезных характеристик в сигнале измерения [1].

В данной работе предложен способ оценки состояния и уменьшения погрешности СИ. Алгоритм тестовых воздействий использует сигнал измерения от одного преобразователя в отличие от методов информационной избыточности и нейронной сети, анализирующих только совокупность сигналов.

1. Использование тестовых воздействий

Алгоритм определения изменения параметров термометра сопротивления (ТС) с использованием тестовых воздействий (алгоритм тестовых воздействий ТВ) получает информацию о состоянии чув-

ствительного элемента посредством дополнительных воздействий. Контроль состояния ТС совмещен с процессом измерения: на ТС подают тестовое воздействие (тестовый ток). Алгоритм ТВ предусматривает два режима работы:

- рабочий – на терморезистор подается импульсный ток номинала I_1 , не вызывающий разогрева терморезистора измерительным током, снимается напряжение U_1 ;
- тестового воздействия – на терморезистор подается импульсный ток номинала I_2 , вызывающий увеличение температуры ТС $\Delta\Theta$ за счет разогрева измерительным током на величину, превышающую допуск температуры более чем в 2 раза, снимается напряжение U_2 .

Алгоритм тестовых воздействий должен использоваться на двух этапах:

- характеристики ТС;
- оценки отклонения метрологических характеристик ТС.

Зависимость электрического сопротивления меди от температуры в первом приближении считаем линейной для диапазона температур $-50 \leq T \leq 200$ °C:

$$R_t = R_0(1 + \alpha T), \quad (1)$$

где R_t , R_0 – сопротивления при температуре t и 0 °C соответственно, Ом; α – температурный коэффициент сопротивления (для меди $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$).

В соответствии с предложенным алгоритмом в режиме тестового воздействия измерительный ток вызывает перегрев ТС на величину $\Delta\Theta$.

Под собственным перегревом ТС $\Delta\Theta$ [4] понимают увеличение температуры ТС по сравнению с измеряемой температурой за счет выделения тепла при прохождении через него измерительного тока. Перегрев зависит от величины измерительного тока, от условий теплоотвода в окружающую среду: от материала, размеров ТС, от состояния и термических свойств среды.

В работах В.И. Лаха [5] показано, что перегрев термометра сопротивления определяется в

Стрелкова Ольга Владимировна – аспирант кафедры информационно-измерительной техники; init@susu.ac.ru.

Шестаков Александр Леонидович – д.т.н., профессор, ректор ЮУрГУ; admin@urc.ac.ru.

основном диаметром проволоки чувствительного элемента и величиной измерительного тока:

$$\Delta\Theta = I^2 / cd^3, \quad (2)$$

где $\Delta\Theta$ – увеличение температуры терморезистора за счет разогрева измерительным током, °С; c – коэффициент пропорциональности.

2. Этап характеризации ТС

Согласно [3] нормированными характеристиками для термометра сопротивления являются сопротивление R_0 при 0° С, отношение W_{100} , определяемое согласно выражению:

$$W_{100} = R_{100} / R_0 = 1 + \alpha T_{100}, \quad (3)$$

где R_{100} – сопротивление ТС при температуре 100 °С; α – ТКС материала чувствительного элемента, К⁻¹; T_{100} – температура 100°С.

При характеризации определяют истинные значения параметров для конкретного ТС – значения сопротивления R_0 и отношение R_{100}/R_0 . После установки датчика в измерительную схему вычисляют коэффициент пропорциональности c между током, протекающим через ТС, и параметрами самого ТС (например, диаметром медной проволоки) и параметрами технологического процесса. Для определения константы используют алгоритм ТВ. При этом ТС работает в двух режимах: рабочем и тестового воздействия.

Сопротивление ТС в режиме тестового воздействия описывается выражением:

$$R_t = R_0(1 + \alpha(T + \Delta\Theta)), \quad (4)$$

где R_t, R_0 – сопротивления при температуре t и 0° С соответственно, Ом; α – температурный коэффициент сопротивления, К⁻¹; T – измеряемая температура, °С; $\Delta\Theta$ – увеличение температуры ТС за счет разогрева измерительным током, °С.

Система уравнений напряжений и токов в цепи для двух режимов:

$$\begin{cases} U_1 = I_1 R_{t1}; \\ U_2 = I_2 R_{t2}, \end{cases} \quad (5)$$

где I_1, I_2 – тестовые токи, А; U_1, U_2 – напряжения на ТС, В; R_{t1}, R_{t2} – сопротивления в рабочем и тестовом режимах соответственно, Ом.

Подставив (1) и (4) в (5), решим систему (4) относительно величины перегрева Θ :

$$\Delta\Theta = (U_2/I_2 - U_1/I_1) / R_0 \alpha. \quad (6)$$

Подставив (2) в (5), получим выражение для константы c , значение которой используется при учете перегрева ТС на этапе оценки технологического параметра:

$$c = \frac{I_2^2}{d^3} \cdot \frac{R_0 \alpha}{(U_2/I_2 - U_1/I_1)}. \quad (7)$$

3. Этап оценки отклонения параметров ТС в процессе эксплуатации

В процессе эксплуатации ТС происходит их старение – необратимые изменения параметров

датчика, вызываемые электрической нагрузкой, повышенной температурой и влажностью окружающей среды.

Выражение для медного ТС с учетом изменения сопротивления R_0 на величину dr и ТКС α на величину $d\alpha$:

$$R_t = (R_0 + dr)(1 + (\alpha - d\alpha)T), \quad (8)$$

где dr – отклонение сопротивления R_0 от номинального значения, Ом; $d\alpha$ – отклонение ТКС от номинального значения, К⁻¹.

Система (5) с учетом отклонения параметров сопротивления R_0 и ТКС от номинальных значений:

$$\begin{cases} U_1 = I_1(R_0 + dr)(1 + (\alpha - d\alpha)T); \\ U_2 = I_2(R_0 + dr)(1 + (\alpha - d\alpha)(T + \Delta\Theta)). \end{cases} \quad (9)$$

С учетом обозначений

$$\begin{aligned} A &= (R_0 + dr); \\ B &= (R_0 + dr)(\alpha - d\alpha), \end{aligned}$$

имеем:

$$\begin{cases} U_1 = I_1(A + BT); \\ U_2 = I_2(A + B(T + \Delta\Theta)), \end{cases} \quad (10)$$

Из (9) получим:

$$B = R_0 \alpha (1 + dr/R_0 - d\alpha/\alpha). \quad (11)$$

Суммарное отклонение параметров R_0 и ТКС α из (11):

$$\frac{dr}{R_0} - \frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{B}{R_0 \alpha} - 1. \quad (12)$$

Выражение для B через напряжение на ТС и ток в цепи из (10):

$$B = (U_2/I_2 - U_1/I_1) / \Delta\Theta. \quad (13)$$

Подставив (13) в (11), выразим суммарное относительное отклонение параметров ТС:

$$\frac{dr}{R_0} - \frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{(U_2/I_2 - U_1/I_1)}{R_0 \alpha \Delta\Theta} - 1.$$

По суммарному отклонению параметров делают вывод о пригодности ТС к эксплуатации. Предельные значения dr_{\max} и $d\alpha_{\max}$ задаются для каждого технологического процесса индивидуально на основании результатов проверок датчиков того же типа и класса точности.

4. Уменьшение погрешности термометра сопротивления

Для определения погрешности измерения температуры в результате старения ТС выразим истинную температуру $T_{\text{ист}}$ из системы (10) через A и B :

$$T_{\text{ист}} = (R_1 - A) / B = (R_1 - R_0) / B - dr / B, \quad (14)$$

где dr – отклонение сопротивления R_0 от номинального значения, Ом; B – коэффициент, зависящий от изменения dr и $d\alpha$.

Измеренную температуру находят на основании зависимости (1). При эксплуатации ТС в период, попадающий в межповерочный интервал, при определении температуры среды текущее от-

клонение нормированных характеристик не учитывается, то есть:

$$dr = 0, d\alpha = 0. \quad (15)$$

Подставив (15) в выражение (14), определим измеренную температуру:

$$T_{изм} = (R_1 - R_0) / (\alpha R_0), \quad (16)$$

Выражение погрешности измерения температуры в рабочем режиме:

$$\Delta T_{изм} = T_{ист} - T_{изм} = \frac{dr}{\alpha R_0} + \left(-\frac{d\alpha}{\alpha} + \frac{dr}{R_0} \right) T_{ист}. \quad (17)$$

Погрешность измерения температуры зависит от величины отклонения параметров ТС от номинальных значений и увеличивается с ростом температуры окружающей среды.

Предложенный алгоритм дает возможность определить суммарное изменение параметров R_0 и ТКС и рассчитать скорректированную оценку температуры среды – $T_{кор}$:

$$T_{кор} = (R_1 - R_0) / B, \quad (18)$$

Погрешность скорректированного значения $T_{кор}$:

$$\Delta T_{кор} = dr / \beta_0 = dr / (\alpha R_0). \quad (19)$$

В скорректированном значении температуры компенсируется погрешность суммарного изменения параметров, но остается погрешность от изменении dr .

5. Обработка экспериментальных данных

Используя экспериментальные данные об отклонении метрологических характеристик медного ТС в результате старения [5], определим эффективность предложенного алгоритма.

В НПО «Термоприбор» проведены комплексные исследования с целью получения числовых данных изменений метрологических параметров терморезисторов и термометров сопротивлений в нормальных условиях. Нормальные условия эксплуатации – неагрессивная среда, отсутствие вибраций, ударов, радиоактивных излучений, теплопритоков и теплооттоков по защитной арматуре.

При определении отклонении R_0 и $W_{100} = R_{100} / R_0$ исследовано около 1000 датчиков температуры на протяжении 10 000 ч согласно инструкциям Госкомитета стандартов СССР № 163-62 и № 157-62 (см. таблицу). Используя экспериментальные данные в таблице, оценим эффективность алгоритма тестовых воздействий. Анализ графиков на рис. 1, 2 показал, что эффективность алгоритма увеличивается с ростом температуры и длительности эксплуатации ТС.

Выводы

1. Алгоритм ТВ позволяет выполнить оценку параметров термометра сопротивления без демонтажа датчика с объекта измерения. Это является важным преимуществом для производства, где замена датчика затруднена и повторное использование не рекомендуется.

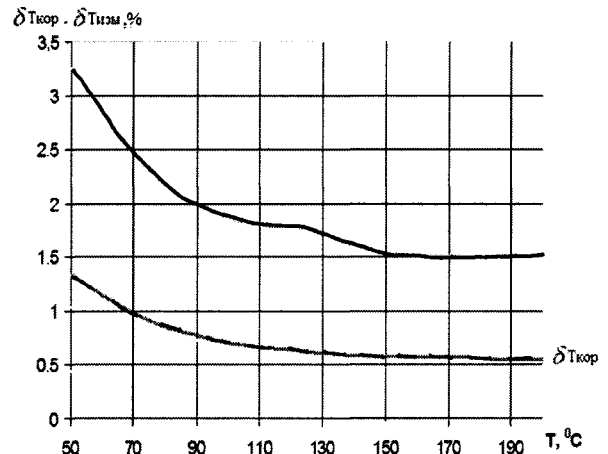


Рис. 1. Зависимость погрешностей измеренного, скорректированного значения температуры $\delta T_{изм}$, $\delta T_{кор}$ от измеряемой температуры

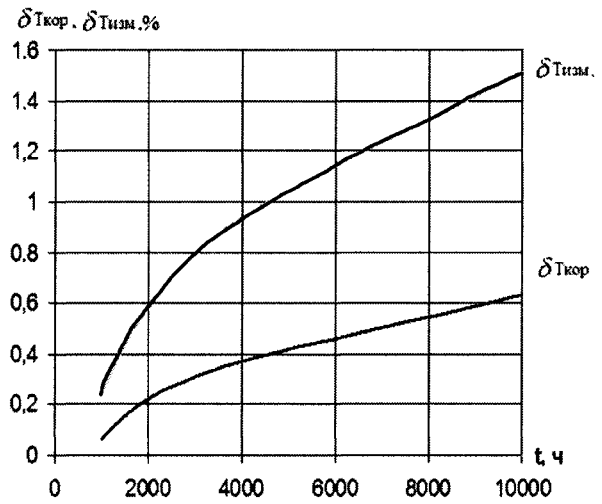


Рис. 2. Зависимость погрешностей измеренного и скорректированного значения температуры $\delta T_{изм}$, $\delta T_{кор}$ от времени эксплуатации ТС

2. Результаты обработки экспериментальных данных подтверждают эффективность алгоритма. Предложенный способ позволяет уменьшить погрешность измерения температуры более чем в два раза.

3. Алгоритм ТВ не требует совокупности выходных данных нескольких преобразователей, анализирует единственный сигнал измерения. Данное исследование снижает затраты на стоимость и эксплуатацию оборудования, что значительно увеличивает экономическую привлекательность разработки.

Литература

- Henry, M. P. *The self-validating sensor: rationale, definitions and examples* / M. P. Henry, D. W. Clarke. – Oxford: Department of Engineering Science, 2001.
- Xu, X. *On-Line sensor calibration monitoring and fault detection for chemical processes* / X. Xu, J. W. Hines, R. E. Uhrig // *Maintenance and Reliability Center*. – 2000.

**Отклонения R_0 и $\Delta R_{100}/R_0$ для медных ТС от их начальных значений
в зависимости от температуры за время эксплуатации**

T, °C	Время, ч									
	1000		4000		6000		8000		10000	
	$\delta R_0, \%$	$\frac{\Delta R_{100}}{R_0}$	$\delta R_0, \%$	$\frac{\Delta R_{100}}{R_0}$	$\delta R_0, \%$	$\frac{\Delta R_{100}}{R_0}$	$\delta R_0, \%$	$\frac{\Delta R_{100}}{R_0}$	$\delta R_0, \%$	$\frac{\Delta R_{100}}{R_0}$
0	0,10	0,0007	0,40	0,0013	0,55	0,0015	0,65	0,0017	0,70	0,0020
50	0,15	0,001	0,45	0,0017	0,60	0,0020	0,70	0,0022	0,75	0,0025
100	0,20	0,0013	0,50	0,0021	0,65	0,0024	0,75	0,0027	0,80	0,0030
125	0,25	0,0017	0,60	0,0025	0,70	0,0029	0,80	0,0032	0,90	0,0035
150	0,35	0,0021	0,70	0,0030	0,80	0,0034	0,90	0,0037	1,00	0,0040

3. ГОСТ 6651-94. Термопреобразователи сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1994.

4. Геращенко, О. А. Температурные измерения: справочник / О. А. Геращенко. – Киев: Наукова думка, 1984. – 494 с.

5. Лах, В. И. Повышение точности и расширение пределов измерения термометров сопротивления / В. И. Лах // Приборы и системы управления. – 1971. – № 9. – С. 23–31.

Поступила в редакцию 15 мая 2008 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С СОБСТВЕННЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ ПРИ ОТДЕЛЕНИИ ОТ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова

Рассмотрены вопросы динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при коротких замыканиях с последующим выходом на раздельную работу. Произведен анализ для условий систем электроснабжения ОАО «ММК». Получены предельные времена отключения коротких замыканий.

Ключевые слова: динамическая устойчивость, системы электроснабжения, промышленные предприятия, короткое замыкание.

Быстрые темпы развития собственной электроэнергетической базы крупных промышленных предприятий вызывают значительное усложнение установившихся и переходных эксплуатационных режимов и существенно расширяют круг задач, решаемых при управлении ими. Важным условием надежной работы собственных источников электроэнергии является устойчивость синхронных генераторов при параллельной и раздельной работе с энергосистемой. Задача обеспечения устойчивости при этом возлагается на диспетчерский персонал энергохозяйства предприятия.

Наиболее распространенным видом аварийных режимов, вызывающим нарушение устойчивости, следует считать короткие замыкания, которые в условиях заводской системы электроснабжения зачастую сопровождаются выходом участка сети с местной электростанцией на раздельную с энергосистемой работу. С целью предотвращения нарушения устойчивости диспетчерскому персоналу необходимо прогнозировать переходные режимы, вызванные такими аварийными ситуациями. Это требует разработки соответствующего программного обеспечения, поскольку которое используется на сегодняшний день, ориентировано на расчет режимов районных энергосистем и не позволяет учесть особенности систем электроснабжения промышленных предприятий, такие,

как малая электрическая удаленность генераторов друг относительно друга, соразмерность мощностей генераторов и нагрузок.

1. Основные теоретические положения

Для анализа динамической устойчивости в этом случае может быть использована комбинация метода последовательного эквивалентирования для расчета установившегося режима в фиксированный момент времени [1] и известного метода последовательных интервалов [2], используемого при расчете параметров режима вдоль оси времени для численного интегрирования дифференциальных уравнений движения, что позволяет учесть действие регулирующих устройств и регулирующего эффекта нагрузки при расчете переходных электромагнитных и электромеханических процессов [3–4].

Основными достоинствами сочетания указанных методов являются сведение расчета на каждом шаге к взаимодействию одномашинной системы (генератор, синхронный двигатель и т.д.) с эквивалентными характеристиками остальной части системы, полученными при расчете установившегося режима, а также исключение систематической погрешности, характерной для метода последовательных интервалов, так как эквивалентирование и развертывание схемы выполняется на каждом интервале времени [1]. На текущем шаге производятся изменения параметров машины, а именно угла ротора, положения регулятора мощности турбины, параметров регулятора возбуждения; у электрических нагрузок изменяются их величины в соответствии со статическими или динамическими характеристиками. Измененные параметры режима машины на рассматриваемом интервале времени являются исходными данными для проведения расчета установившегося режима в конце интервала.

При работе системы электроснабжения раздельно с питающей энергосистемой её режим претерпевает существенные изменения. Небаланс ре-

Малафеев Алексей Вячеславович – к.т.н., доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; mgtu@magtu.ru.

Буланова Ольга Викторовна – к.т.н., старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; mgtu@magtu.ru.

Ротанова Юлия Николаевна – старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; rotjuil720@mail.ru.

активной мощности приводит к значительному изменению напряжения в выделившейся сети, величина которого зависит от действия регуляторов возбуждения синхронных генераторов и регулирующего эффекта нагрузки по напряжению. Вследствие возникающего небаланса вырабатываемой и потребляемой активной мощности (1), который в нормальном режиме ложится на узлы примыкания к энергосистеме, изменяется частота. Расчёт переходных режимов осложняется необходимостью учёта динамических характеристик систем регулирования скорости турбин и большой длительностью переходного процесса.

Уравнение баланса мощностей выглядит следующим образом:

$$\Delta P = P_{T(0)} \frac{\omega_{(n-1)}}{\omega_{(0)}} - P_{эм(n)} + P_{пар(n)} - P_{асΣ} - P_{рег(n)} - P_{зн} - P_{т.ст} - P_{т.рот}, \quad (1)$$

где n – номер интервала, $P_{T(0)}$ – мощность на валу турбины, $\omega_{(n-1)}/\omega_{(0)}$ – отношение текущего значения скорости к начальному, $P_{эм(n)}$ – электромагнитная мощность синхронной машины, $P_{пар(n)}$ – мощность, учитывающая влияние парового объема турбины, $P_{рег(n)}$ – мощность, учитывающая действие регулятора скорости паровой турбины, $P_{зн}$ – знакопеременная тормозная мощность синхронной машины, $P_{т.ст}$ – тормозная мощность, обусловленная потерями в статоре, $P_{т.рот}$ – тормозная мощность, обусловленная потерями в роторе, $P_{асΣ}$ – мощность, которая характеризует взаимные асинхронные мощности синхронных генераторов друг относительно друга в выделившемся участке сети.

$$P_{асΣ} = P_{ас(12)} + P_{ас(13)} + \dots + P_{ас(1m)},$$

где m – число генераторов в выделившейся сети.

$$P_{ас.12} = - \left(\frac{U^2}{2} \cdot \frac{P_2}{\sum P} \right) \left(\left(\frac{s_{12} T_d'}{1 + s_{12}^2 T_d'^2} \right) \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) + \left(\frac{s_{12} T_d''}{1 + s_{12}^2 T_d''^2} \right) \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) + \left(\frac{s_{12} T_d'}{1 + s_{12}^2 T_d'^2} \right) \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \right), \quad (2)$$

где U – напряжение на выводах машины, $s_{12} = (\omega_2 - \omega_1)/\omega_2$ – взаимное скольжение; ω_1, ω_2 – скорости текущего генератора и генератора, относительно которого определяется асинхронная мощность соответственно.

Новое установившееся значение частоты по окончании переходного процесса будет определяться работой первичных регуляторов скорости турбин и видом динамических характеристик комплексной нагрузки [5].

Такой алгоритм позволит определять параметры переходных режимов при коротких замыканиях с последующим выходом на отдельную работу, а также при коротких замыканиях, имеющих место в автономной сети.

2. Характеристика объекта исследования

Решение такой задачи актуально в условиях Магнитогорского промышленного узла, энергетика которого в последние годы получила существенное развитие. Введены дополнительные мощности на крупных электростанциях ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС, суммарная мощность которых достигла 630 МВт, построены новые электростанции в районах крупных технологических цехов. Получили дальнейшее развитие распределительные сети 110 кВ, введены в действие крупные потребители электроэнергии в сталеплавильном и прокатном производстве, сооружается новый крупный потребитель – листопрокатный стан «5000» горячей прокатки. Все эти мероприятия приводят к усложнению распределительных сетей, росту потоков мощности, увеличению токов короткого замыкания и вероятности возникновения аварийных ситуаций.

Для обеспечения надёжной и эффективной работы узлов с собственными электростанциями за счет повышения устойчивости на основе предложенного алгоритма разработано специализированное программное обеспечение, ориентированное на анализ динамической устойчивости генераторов и двигателей собственных нужд электростанций при коротких замыканиях с учетом изменения конфигурации схемы вплоть до ее полного отделения от энергосистемы. Программа позволяет учитывать динамические характеристики комплексной нагрузки в зависимости от состава потребителей, динамические характеристики отдельных крупных электроприемников, самозапуск высоковольтных синхронных и асинхронных двигателей [4].

3. Результаты расчета

Рассмотрим режим короткого замыкания с последующим выходом на отдельную работу узла ТЭЦ. На рис. 1 приведены кривые изменения взаимных углов роторов генераторов, из которых видно, что наименее устойчивыми генераторами являются ТГ-5, 6, работающие по блочной схеме, в связи со своей электрической приближенностью к точке короткого замыкания. На рис. 2, 3 в качестве примера приведены кривые изменения асинхронной мощности и скорости ТГ-5, из которых видно, что генераторы стремятся к новому установившемуся режиму.

При анализе различных режимов выхода на отдельную работу собственных электростанций было определено, что предельное время отключения короткого замыкания на шинах 110 кВ ТЭЦ составляет 0,4–0,6 с. Так как узел является избыточным по активной и реактивной мощности, в нем наблюдается повышение частоты до 50,023 Гц и напряжения до 123,3 кВ. Для узла ЦЭС–ПВЭС предельное время –

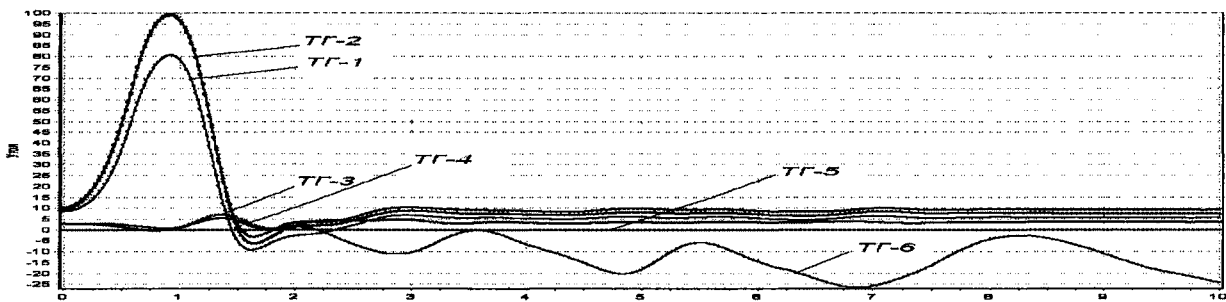


Рис. 1. Взаимные углы роторов генераторов ТЭЦ ОАО «ММК» относительно ТГ-5

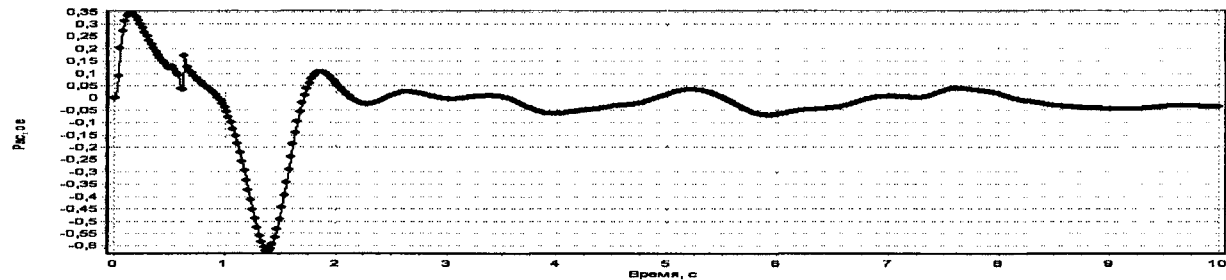


Рис. 2. Изменение асинхронной мощности ТГ-5

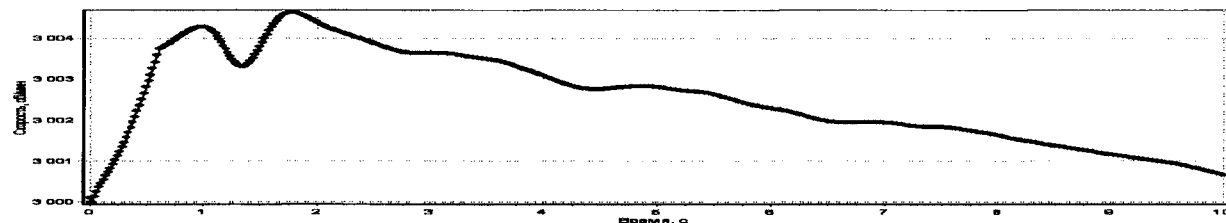


Рис. 3. Изменение скорости ТГ-5

0,1–0,4 с, значения частоты и напряжения достигают 50 Гц и 115 кВ соответственно.

Заключение

В ходе разработки программы было установлено, что учет асинхронной мощности при расчете режимов систем электроснабжения промышленных предприятий (2) при раздельной с энергосистемой работе является определяющим, так как возникающий асинхронный момент позволяет генераторам достигнуть нового установившегося режима с новым значением частоты.

В созданном программном обеспечении есть возможность исследования следующих разновидностей режимов после короткого замыкания: ликвидация короткого замыкания за счет отключения элемента сети с сохранением параллельной работы, ликвидация короткого замыкания с отделением от энергосистемы и последующим восстановлением в результате действия релейной защиты и противоаварийной автоматики, исследование режима короткого замыкания в выделенной сети.

Литература

1. Игуменцев, В. А. Расчет установившегося режима системы электроснабжения промышленного предприятия методом последовательного эквивалентирования / В. А. Игуменцев, И. А. Саламатов, Ю. П. Коваленко // *Электричество*. – 1986. – № 8. – С. 7–12.

2. Жданов, П. С. Вопросы устойчивости энергетических систем / П. С. Жданов; под ред. Л. А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.

3. Игуменцев, В. А. Расчет установившегося режима в задачах диспетчерского управления системой электроснабжения усовершенствованным методом последовательного эквивалентирования / В. А. Игуменцев, А. В. Малафеев, В. В. Зиновьев // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – 2006. – № 3.

4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007611306. «Расчет и оптимизация установившихся и переходных эксплуатационных режимов параллельной и раздельной работы с энергосистемой и режимов замыкания на землю с оценкой влияния на электрооборудование в системах электроснабжения промышленных предприятий» / В. А. Игуменцев, В. В. Зиновьев, А. В. Малафеев, О. В. Буланова // *Программы для ЭВМ, базы данных, ТИМС* – М.: ФИПС, 2007. – №2.

5. Ротанова, Ю. Н. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий на примере ОАО «ММК» при трехфазных коротких замыканиях с учетом динамических характеристик нагрузки / Ю. Н. Ротанова // *Сб. докл. Международной научно-технической конференции «Энергетика и энергоэффективные технологии»*, Липецк, 2007. – С. 44–50.

Поступила в редакцию 31 января 2008 г.

ABSTRACTS AND KEYWORDS

Shestakov A.L., Kazarinov L.S. Programme «Energy and resource-saving technologies» of the national project «Education».

The main directions of SUSU Electronics' faculty's works for realization of the programme «Energy and resource-saving technologies» of the national project «Education» are examined.

Keywords: South Ural State University, SUSU, Electronics' faculty, national project «Education».

Kazarinov L.S., Shnaider D.A. Operational engineering processes control with prognosis of energy efficiency indices.

Models and methods of operational engineering processes control with prognosis of current values of energy efficiency indices are examined, system scheme of operational engineering processes control with optimal control loop according to energy efficiency indices with sufficiently general character to optimize the regimes of engineering processes of wide range is proposed.

Keywords: operational control, engineering processes, energy efficiency, prognosis of indices.

Koptsev L.A., Zhuravlev Y.P. Control of energy efficiency of arc-furnace plant.

The article considers the approaches to control of energy efficiency of arc-furnace plant, adduces empirical dependences which allow optimizing the energy balance of arc steel-smelting furnace by predictable changes in valuation of composing energy resources.

Keywords: arc-furnace plant, arc steel-smelting furnace, energy balance, energy efficiency.

Kazarinov L.S., Ignatova T.A., Kinash A.V., Kolesnikova O.V., Shnaider D.A. Operational regulation of combustion economy in power boilers.

Method of automatic optimization of the combustion process in the power boiler furnace on the basis of prediction value of boiler coefficient of efficiency which allows reducing of inertance of automatic regulating system of economy of combustion process is examined. Time characteristics of search of optimal coefficient of efficiency value are given.

Keywords: steam boilers, power boilers, combustion process, optimization of combustion process, economy of combustion process, regulation of combustion process.

Kazarinov L.S., Ignatova T.A., Kolesnikova O.V. Optimization of twin turbochargers load according to exploitation data by incomplete source data.

Problems of optimization of twin turbochargers load according to exploitation data by incomplete source data and ways of their decision are examined. Mathematical algorithm of load optimization problem

is given, as well as the programme «TG-PAR» and results of optimization of heat power plant of open joint stock company «Magnitogorsk metallurgical industrial complex» twin turbochargers load with the help of the programme «TG-PAR».

Keywords: turbochargers, optimization of turbochargers load.

Shnaider D.A. Computer-based supervisory control system of building heat supply on the basis of field technologies.

The article considers the structure, functions and technical peculiarities of computer-based supervisory control system of building heat supply on the basis of field technologies, results of digital monitoring of heat supply of buildings parameters obtained on the basis of usage of introduced computer-based systems are given.

Keywords: heat supply supervisory control, heat networks, field technologies.

Karmanov Y.T., Spitsyn V.S., Grigorev M.M., Spitsyn V.V. Flexible decision for wireless data transfer in the «Smart home» technologies.

The wireless variant of system of collection of information about resources consumption in apartment houses is examined. An advantageous way to organize a wireless network of high density consisting of off-line recourses flow radiosensors on the basis of standard technology of wireless sensory networks is proposed.

Keywords: wireless data transfer, smart home.

Karmanov Y.T., Karmanov A.Y. Provision of radio signal reception from devices registering the consumption of energy resources in dwelling apartments against the noise by their additional modulation.

Way of noise cancellation in the system of data-transmission by radio channels from devices registering the consumption of energy resources in dwelling apartments by their additional frequency modulation is proposed and researched.

Keywords: devices registering energy resources, frequency modulation.

Degtyar A.B., Panferov V.I. Projection of algorithm of pulsed building heating and research of the modes of its work.

The article describes most probable ways of heat energy conservation at pulsed mode of domestic heating, the mechanism of pulsed mode projection, and mathematical model of control of the present mode of heating functioning.

Keywords: building heating, pulsed heating, modes of heating, heat energy conservation.

Shnaider D.A. Operational flow control of power resources in production networks with regards to dynamics of their accumulation.

The article considers the approach to the operational flow control of power resources in production networks with regards to dynamics of their accumulation on the basis of mathematical model usage. Example of application of the present approach to control to steam supply system of a large metallurgic plant is given.

Keywords: operational control, power resources, production networks, accumulation of recourses.

Vakhromeev I.E., Evchina Y.B., Shnaider D.A. Automated process control in refrigerating plants of power stations.

The article considers the issues of general structure of refrigerating plants, possible ways to optimize the work of refrigerating, scheme of automated control of cooling processes in graduation tower is given.

Keywords: refrigerating plants, power stations, automated control.

Shnaider D.A., Divnich P.N., Barbasova T.A. Automated compressor plant.

Main results of mode design of jet vapor compressor aimed to increase the parameters of low-potential waste steam for its efficient utilization are stated. Computer-based control system of compressor plant modes is described.

Keywords: automation, compressor plant.

Kazarinova V.L., Shnaider D.A. Certification of industrial customers of fuel-energy recourses with resort to automation facilities.

Basic design principles of computer-based information system (CBIS) for conducting energy registration certificates of industrial customers are considered. Structure of database, main functions of user interface, order of work with CBIS are given. As the result of the systems implementation on an industrial plant the appraisal engineers receive objective information about the level and efficiency of the plant usage of fuel-energy recourses.

Keywords: certification, fuel-energy recourses, automation facilities.

Vernergold A.R., Kazarinov L.S., Kolesnikova O.V. Linguistic approach to optimization of waelz-process control.

Main issues of waelz-process of zinc cakes, method of waelz-process optimization on the base of linguistic rules, algorithm of selection of Pareto region of optimal modes in information database of automated engineering processes control system are examined.

Keywords: waelz-process, control optimization, waelz-process optimization, fuzzy logic.

Vukolova A.L., Nikolaenko A.V. Real temperature estimation method of metal of boiler heating surface.

Calculation method of real temperature and residual life of metal is examined. It allows determining the most heat-stressed zones, knots and elements with maximal temperature of metal, establishing the reason of occurrence and development of defects, estimating the productive life, planning partial or total substitution of metal for rational carrying out of routine maintenance.

Keywords: temperature of metal, nondestructive check, on-line inspection, heating surface.

Strelkova O.V., Shestakov A.L. Analysis algorithm of resistance temperature device state with usage of test exposure.

Application of test exposure to state estimation of resistance thermometer is considered. The proposed algorithm allows estimating of changes in resistance thermometer's (RT) parameters in real-time mode, drastically decreasing of inaccuracy of measurements determined by change of RT metrological performance while in service.

Keywords: resistance temperature device, test exposure, thermometer performance.

Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Y.N. Research of dynamical stability of industrial power systems with own power stations at separation from the electric system in the result of short-circuit failure.

Issues of dynamical stability of industrial power systems with own power stations at short-circuit failures with subsequent separate work are considered. Analysis for conditions of power-supply systems of open joint stock company «Magnitogorsk metallurgical industrial complex» is conducted. Critical fault-clearance time is obtained.

Keywords: dynamical stability, power-supply systems, industrial plants, short-circuit failure.

AUTHORS INFORMATION

Tatyana A. Barbasova – PhD, associate professor of automation and control department of South Ural State University (SUSU); barbasow@mail.ru.

Olga V. Bulanova – PhD, senior teacher of industrial power supply department of G.N. Nosov Magnitogorsk State Technical University; mgtu@magtu.ru.

Alexander B. Degtyar – post-graduate student of heat and gas supply and ventilation department of SUSU; tgsiv@susu.ac.ru.

Petr N. Divnich – post-graduate student of automation and control department of SUSU; Divnich@mmk.ru.

Yuliya B. Evchina – magstrand of automation and control department of SUSU; julia220386@yandex.ru.

Maxim M. Grigoriev – assistant of digital radio engineering systems department of SUSU.

Tatyana A. Ignatova – engineer of automation and control department of SUSU; tanya_ignatova@mail.ru.

Alexey Y. Karmanov – lieutenant colonel, tutor of Chelyabinsk higher aviation school of navigators, degree-seeking student at radio equipment design and manufacturing department of SUSU; ea@drts.susu.ac.ru.

Yury T. Karmanov – PhD, professor, head of digital radio engineering systems department of SUSU; ea@drts.susu.ac.ru.

Lev S. Kazarinov – PhD, professor, dean of electronics faculty of SUSU, head of automation and control department of SUSU; kazarinov@ait.susu.ac.ru.

Vera L. Kazarinova – PhD, associate professor of automation and control department of SUSU; kzveral@ait.susu.ac.ru.

Alexander V. Kinash – leading expert on automation of central power station of «Magnitogorsk metallurgical industrial complex» (open joint stock company); kinash@mmk.ru.

Olga V. Kolesnikova – PhD, associate professor of automation and control department of SUSU; popova_ov@ait.susu.ac.ru.

Leonid A. Koptsev – PhD, head of energy supply analysis and control laboratory of «Magnitogorsk metallurgical industrial complex» (open joint stock company); lak_energo@mmk.ru.

Alexey V. Malafeev – PhD, associate professor of industrial power supply department of G.N. Nosov Magnitogorsk State Technical University; mgtu@magtu.ru.

Alexey V. Nikolaenko – post-graduate student of automation and control department of SUSU; nikolaenko@chel.iceu.ru.

Vladimir I. Panferov – PhD, professor, head of heat and gas supply and ventilation department of SUSU; tgsiv@susu.ac.ru.

Yuliya N. Rotanova – senior teacher of industrial power supply department of G.N. Nosov Magnitogorsk State Technical University; rotjuil720@mail.ru.

Alexander L. Shestakov – PhD, professor, rector of SUSU; admin@urc.ac.ru.

Dmitry A. Shnaider – PhD, associate professor of automation and control department of SUSU; shnyder@ait.susu.ac.ru.

Vasily V. Spitsyn – post-graduate student of digital radio engineering systems department of SUSU; svd@drts.susu.ac.ru.

Vladimir S. Spitsyn – associate professor of digital radio engineering systems department of SUSU; svd@drts.susu.ac.ru.

Olga V. Strelkova – post-graduate student of data instrumentation department; init@susu.ac.ru.

Ivan E. Vakhromeev – steam-power superintendent of «Magnitogorsk metallurgical industrial complex» (open joint stock company), post-graduate student of SUSU; vahromeev@mmk.ru.

Alexander R. Vernergold – control and measuring apparatus superintendent, chief metrologist of «Chelyabinsk zinc plant» (open joint stock company); arv@zinc.ru.

Alina I. Vukolova – PhD, leading researcher of the branch «UralVTI-Chelyabenergosetproekt» of «Engineering centre of Ural power engineering»; vukail@chel.iceu.ru.

Yury P. Zhuravlev – chief power engineer of «Magnitogorsk metallurgical industrial complex» (open joint stock company); jup@mmk.ru.

Подписной индекс Вестника ЮУрГУ, серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»: 29008, объединенный каталог «Пресса России». Периодичность выхода – 2 номера в год.

*Информация о «Вестнике ЮУрГУ» и требования к оформлению статей доступны в Интернет по адресу:
<http://www.susu.ac.ru/ru/science/publish/vestnik/>*

**ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

№ 17 (117) 2008

**Серия
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ,
РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»
Выпуск 8**

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 08.07.2008. Формат 60×84 1/8. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 9,30. Уч.-изд. л. 9,14. Тираж 500 экз. Заказ 283/297.

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.